



รายงานการวิจัย

การเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้เทคนิคอภิวัด
ที่อยู่ในรูปแบบโครงสร้างช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบดอกเห็ด

สำหรับสถานีเชื่อมต่อสัญญาณ

(Efficiency improvement for Conical Horn Antenna by using
Metamaterials on Mushroom-like Electromagnetic Band Gap Structure
for Microwave Link Stations)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รายงานการวิจัย

การเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้เทคนิคอภิวัด
ที่อยู่ในรูปแบบโครงสร้างช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบดอกเห็ด
สำหรับสถานีเชื่อมต่อสัญญาณ

(Efficiency improvement for Conical Horn Antenna by using
Metamaterials on Mushroom-like Electromagnetic Band Gap Structure
for Microwave Link Stations)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ วงศ์สรณ์

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นายภูมิพงษ์ ดวงตั้ง

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2560

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สามารถดำเนินการได้และได้รับผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ โดยได้รับทุนสนับสนุนในการดำเนินการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2559 สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ นายภูมิพงษ์ ดวงตั้ง ผู้ร่วมวิจัยซึ่งช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี อีกทั้งขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ช่วยทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

รังสรรค์ วงศ์สรรค์



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคการเพิ่มอัตราขยายรวมของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้เทคนิคอภิวัดที่อยู่ในรูปแบบโครงสร้างช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบดอกเห็ดสำหรับสถานีเชื่อมต่อสัญญาณจากการวิจัยพบว่าจากเทคนิคดังกล่าวสามารถลดขนาดของสายอากาศปากแตรลงมาได้ประมาณ 50% และมีอัตราขยายเท่ากับ 17.5 dBi โดยเพิ่มขึ้นจากสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐานเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอการนำคุณสมบัติอภิวัดในรูปแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดซึ่งสามารถพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศ โดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนกำลังงานผ่านโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดเทคนิคอภิวัดบนโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดนั้นได้ถูกนำมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศปากแตรรูปกรวยซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐาน โดยทำการออกแบบที่ความถี่ 10 GHz ในย่าน X-Band เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับการเชื่อมต่อสัญญาณไมโครเวฟ (microwave link) ผ่านสถานีทวนสัญญาณ นอกจากนี้ได้นำเทคนิคการใส่โพลติไดอิเล็กตริกเข้าไปภายในโครงสร้างของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานเพื่อปรับปรุงแบบรูปการแผ่พลังงานให้มีลักษณะที่สมมาตร ในการออกแบบและวิเคราะห์ผลได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CST (Computer Simulation Technology) จากเทคนิคดังกล่าวพบว่าสามารถเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานจากเดิม 17.7 dBi เพิ่มเป็น 20.9 dBi โดยมีอัตราขยายเพิ่มขึ้นจากเดิม 3.2 dBi และมีระดับฟูซิงลดลง จากนั้นทำการสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อนำมาวัดทดสอบเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองผล พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ แบบรูปการแผ่พลังงานและอัตราขยายที่ได้มีผลที่สอดคล้องกันตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้

Abstract

This research proposes a technique to enhance the total gain of conical horn antenna by using Metamaterials on Mushroom-like Electromagnetic Band Gap Structure for Microwave Link Stations. We found that the length of new conical horn antenna is shorter than of the conventional conical horn antenna about 50 %, while the obtained gain is about 17.5 dB, which slightly higher than the conventional horn. In addition, the researcher has proposed the optimization of conical horn antenna by using the metamaterial technique with a structure of wire medium placed on the conical horn aperture without modification the antenna dimension, which is designed at 10 GHz of the X-band operating frequency for microwave link applications. In addition, the loaded dielectric is inserted inside the structure of such conical horn antenna to improve the symmetry of the both planes of radiation pattern. The CST (Computer Simulation Technology) software is used to design and analyze the proposed structure. The results show that the wire medium structure can enhance the gain total of a conventional conical horn antenna from 17.7 dBi to 20.9 dBi or increase around 3.2 dBi approximately, while its side lobe levels are also reduced. Finally, a prototype antenna is fabricated and its fundamental parameters including the reflection coefficient (S11), radiation patterns, and directive gain are measured. The simulated and measured results are in very good agreement according to the hypothesis and research process.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 บทนำ.....	4
2.2 สายอากาศปากแตร.....	4
2.3 อภิวัดดู.....	7
2.4 ช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า.....	8
2.5 ตัวกลางแบบเส้นลวด.....	10
2.6 สรุป.....	16
บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
3.1 บทนำ.....	17
3.2 สายอากาศปากแตร.....	17
3.2.1 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบหลัก.....	23
3.2.2 สภาพเจาะจงทิศทาง.....	24
3.3 สายอากาศปากแตรรูปกรวย.....	26
3.3.1 จุดศูนย์กลางเฟส.....	31
3.4 อภิวัดดู.....	32
3.5 โพรงช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบดอกเห็ด.....	35
3.6 ตัวกลางแบบเส้นลวด.....	37
3.6.1 ความถี่พลาสมาสำหรับตัวกลางแบบเส้นลวด.....	40
3.6.1 การกระจายตัวเชิงพื้นที่สำหรับตัวกลางแบบเส้นลวด.....	41
3.7 สรุป.....	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล	
4.1 บทนำ.....	44
4.2 การออกแบบสายอากาศปากแตรรูปกรวย.....	44
4.3 การปรับปรุงประสิทธิภาพสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้ คุณสมบัติของวัสดุในรูปแบบโครงสร้างช่องว่างแถบความถี่ แม่เหล็กไฟฟ้าแบบดอกเห็ด.....	49
4.3.1 การพิจารณาวัสดุในรูปแบบของโครงสร้างโพรงช่องว่าง แถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบดอกเห็ด.....	49
4.3.2 การออกแบบการประยุกต์ใช้ช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า แบบดอกเห็ดร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน.....	54
4.3.2.1 การพิจารณาระยะตำแหน่งการวางโครงสร้างช่องว่าง แถบความถี่แม่เหล็กแบบดอกเห็ดหน้าปากอะเพอร์เจอร์ ของสายอากาศปากแตร.....	55
4.3.3 การออกแบบการประยุกต์ใช้ช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบ ดอกเห็ดร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานกรณีลด ความยาวสายอากาศปากแตร.....	57
4.3.3.1 การพิจารณาลดขนาดความยาวของสายอากาศปากแตร รูปกรวยขนาดมาตรฐาน.....	57
4.3.3.2 การประยุกต์โครงสร้าง EBG เพื่อเพิ่มอัตราขยายของ สายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานในกรณีลด ความยาวของสายอากาศ.....	60
4.4 การปรับปรุงประสิทธิภาพแบบรูปการแผ่พลังงานโดยใช้โหนดไดอิเล็กตริก.....	65
4.4.1 พิจารณาจุดศูนย์กลางเฟสสายอากาศปากแตรรูปกรวย.....	66
4.4.2 การออกแบบและวิเคราะห์รูปแบบโครงสร้างโหนดไดอิเล็กตริก.....	67
4.4.2.1 การพิจารณาขนาดรัศมีของโหนดไดอิเล็กตริก.....	69
4.4.2.2 การพิจารณาขนาดความหนาของโหนดไดอิเล็กตริก.....	70
4.4.2.3 การพิจารณาตำแหน่งการวางโหนดไดอิเล็กตริก.....	71
4.5 การออกแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด.....	76
4.6 การพิจารณาโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดสำหรับทำงานร่วมกับ สายอากาศปากแตรรูปกรวย.....	80

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6.1 การพิจารณาตำแหน่งการระยว้างโครงสร้างตัวกลางแบบ เส้นลวดที่ตำแหน่งปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตร.....	85
4.6.2 การพิจารณาชนิดไดโอดีเล็กตริกที่วางกันระหว่างชั้นของแนว ระนาบเส้นลวดของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด.....	86
4.6.3 การพิจารณาจำนวนชั้นของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด.....	88
4.6.4 สายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้เทคนิคอภิวัดศุบน โครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่นำเสนอ.....	89
4.7 การพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวย.....	94
4.8 สรุป.....	97
บทที่ 5 ผลการสร้างและวัดทดสอบ	
5.1 บทนำ.....	98
5.2 สายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน.....	98
5.2.1 ผลการวัดทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน.....	100
5.2.2 ผลการวัดทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่ง.....	101
5.2.3 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์.....	102
5.2.4 ผลการวัดทดสอบอัตราขยาย.....	102
5.2.5 ผลการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน.....	104
5.3 สายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีใส่โหลดไดโอดีเล็กตริก.....	108
5.3.1 ผลการวัดทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน.....	110
5.3.2 ผลการวัดทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่ง.....	111
5.3.3 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์.....	112
5.3.4 ผลการวัดทดสอบอัตราขยาย.....	112
5.3.5 ผลการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน.....	114
5.4 สายอากาศปากแตรโดยใช้คุณสมบัติอภิวัดศุบนโครงสร้าง ตัวกลางแบบเส้นลวด.....	118
5.4.1 ผลการวัดทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน.....	120
5.4.2 ผลการวัดทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่ง.....	121
5.4.3 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์.....	121
5.4.4 ผลการวัดทดสอบอัตราขยาย.....	122
5.4.5 ผลการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน.....	124

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.5 การเปรียบเทียบผลการจำลองโครงสร้างสายอากาศและการวัดทดสอบ.....	129
5.6 สรุป.....	130
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	131
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	134
บรรณานุกรม.....	135
ประวัติผู้วิจัย.....	140



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ลำดับการอ้างอิงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง...	11
ตารางที่ 3.1 จุดศูนย์กลางเฟสของสายอากาศปากแตรรูปกรวยภายใต้โหมด TE_{11} สำหรับอัตราส่วน รัศมีมุมเอียงของปากแตร.....	32
ตารางที่ 4.1 ผลการจำลองค่าพารามิเตอร์สายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐาน.....	49
ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างโพรงช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า.....	53
ตารางที่ 4.3 ผลการจำลองค่าพารามิเตอร์สายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐานกรณีลดความยาวสายอากาศลงมา 50%.....	59
ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์สายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐานกับสายอากาศที่นำเสนอ.....	64
ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ระหว่างสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐานกับสายอากาศปากแตรกรณีใส่โหลดไดโอดเล็กตริก.....	75
ตารางที่ 4.6 สรุปลค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้เทคนิคอภิวัดบนโครงสร้างสี่ตัวกลางแบบเส้นลวดที่สมบูรณ์.....	91
ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวย 4 รูปแบบ.....	96
ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานต้นแบบ.....	99
ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีใส่โหลดไดโอดเล็กตริก.....	109
ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของโครงสร้างสี่ตัวกลางแบบเส้นลวด.....	118
ตารางที่ 5.4 การเปรียบเทียบอัตราขยายของสายอากาศ 3 รูปแบบ.....	130
ตารางที่ 5.5 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศระหว่างการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัดจากสายอากาศต้นแบบ.....	130

สารบัญรูป

	หน้า	
รูปที่ 3.1	ลักษณะของสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากทั้ง 3 แบบหลัก.....	18
รูปที่ 3.2	ภาพตัดขวางในระนาบสนามแม่เหล็กหรือระนาบ x-z ของปากแตรแบบเซกเตอร์.....	18
รูปที่ 3.3	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรแบบเซกเตอร์ระนาบ.....	23
รูปที่ 3.4	กราฟแสดงสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศปากแตรแบบเซกเตอร์ ในระนาบสนามแม่เหล็กซึ่งมีระยะของ R_0 แตกต่างกัน.....	25
รูปที่ 3.5	ลักษณะของสายอากาศปากแตรรูปกรวย.....	26
รูปที่ 3.6	กราฟแสดงการคำนวณอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดย แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของปากอะเพอร์เจอร์และความยาว ของสายอากาศปากแตรรูปกรวย.....	27
รูปที่ 3.7	กราฟแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า.....	30
รูปที่ 3.8	กราฟแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	30
รูปที่ 3.9	โครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยแนวตัดขวาง.....	31
รูปที่ 3.10	แผนผังสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็ก.....	34
รูปที่ 3.11	โพรงของ EBG แบบ 3 มิติ.....	36
รูปที่ 3.12	EBG แบบ 2 มิติ.....	36
รูปที่ 3.13	พารามิเตอร์และรูปแบบของค่าเหนี่ยวนำและค่าความจุของโพรง EBG.....	36
รูปที่ 3.14	โครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด.....	39
รูปที่ 4.1	โครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน.....	45
รูปที่ 4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของปากอะเพอร์ ของสายอากาศปากแตรรูปกรวย (dm) กับความยาวของสายอากาศปากแตร ($L1$) ที่ส่งผลต่ออัตราขยายของสายอากาศ.....	45
รูปที่ 4.3	โครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานที่ทำการจำลอง การออกแบบด้วยโปรแกรม CST.....	46
รูปที่ 4.4	ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบ 3 มิติของสายอากาศปากแตร รูปกรวยขนาดมาตรฐานที่ทำการจำลองการออกแบบด้วยโปรแกรม CST.....	46
รูปที่ 4.5	ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวย ขนาดมาตรฐาน.....	47
รูปที่ 4.6	ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับสายอากาศปากแตรรูปกรวย ขนาดมาตรฐาน.....	48
รูปที่ 4.7	รูปแบบการประยุกต์ใช้งานระหว่างสายอากาศและโครงสร้างโพรงช่องว่าง แถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า.....	50

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 4.8	โครงสร้างโพรงช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กแบบดอกเห็ด.....	51
รูปที่ 4.9	โครงสร้างโพรงช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กแบบดอกเห็ดกรณีทำการปรับแต่ง โดยการเซาะร่องรูปวงแหวนสี่เหลี่ยม.....	52
รูปที่ 4.10	กราฟแสดงช่องว่างแถบความถี่ของโครงสร้างโพรงช่องว่างแถบความถี่ แม่เหล็กไฟฟ้าแบบดอกเห็ด.....	53
รูปที่ 4.11	โครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยที่พัฒนาทำงานร่วมกับช่องว่างแถบ ความถี่แม่เหล็กแบบดอกเห็ด.....	54
รูปที่ 4.12	โครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยที่จะดำเนินการพัฒนาทำงานร่วมกับ ช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กแบบดอกเห็ดที่ทำการจำลองการออกแบบ ด้วยโปรแกรม CST.....	54
รูปที่ 4.13	รูปแบบการพิจารณาระยะห่างในการวางโครงสร้าง EBG ที่หน้าปาก อะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตรรูปกรวย.....	55
รูปที่ 4.14	ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศปากแตรรูปกรวย ขนาดมาตรฐานกรณีวางโครงสร้าง EBG ห่างจากแนวระนาบปากอะเพอร์เจอร์ ที่ระยะต่างๆ.....	56
รูปที่ 4.15	อัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานกรณีวาง โครงสร้าง EBG ห่างจากแนวระนาบปากอะเพอร์เจอร์ที่ระยะต่างๆ.....	56
รูปที่ 4.16	โครงสร้างของสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีลดขนาดความยาว ของสายอากาศ.....	57
รูปที่ 4.17	โครงสร้างของสายอากาศปากแตรรูปกรวยที่ทำการลดขนาดความยาวของ สายอากาศที่ทำการจำลองการออกแบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST.....	57
รูปที่ 4.18	ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับสายอากาศปากแตรรูปกรวย ขนาดมาตรฐาน.....	58
รูปที่ 4.19	ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวย กรณีลดความยาวสายอากาศลงมา 50%.....	59
รูปที่ 4.20	โครงสร้างของสายอากาศปากแตรรูปกรวยที่ทำการจำลองการออกแบบ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST.....	60
รูปที่ 4.21	ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศปากแตรรูป กรวยขนาดมาตรฐานกรณีวางโครงสร้าง EBG ห่างจากแนวระนาบปาก อะเพอร์เจอร์ที่ระยะต่างๆ.....	61

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.22 อัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานกรณีวาง โครงสร้าง EBG ห่างจากแนวระนาบปากอะเพอร์เจอร์ที่ระยะต่างๆ.....	61
รูปที่ 4.23 โครงสร้างของสายอากาศปากแตรรูปกรวยที่ทำการลดขนาดความยาวของ สายอากาศกรณีต่อทำงานร่วมกับโครงสร้าง EBG ที่นำเสนอ.....	62
รูปที่ 4.24 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับสายอากาศปากแตรรูปกรวยที่ทำ การลดขนาดความยาวของสายอากาศกรณีต่อทำงานร่วมกับโครงสร้าง EBG ที่นำเสนอ.....	62
รูปที่ 4.25 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวยลดขนาด ความยาวของสายอากาศกรณีต่อร่วมกับโครงสร้าง EBG ที่นำเสนอ.....	63
รูปที่ 4.26 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของโครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยมาตรฐาน สำหรับคำนวณจุดศูนย์กลางเฟส.....	66
รูปที่ 4.27 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางเฟสสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน	67
รูปที่ 4.28 โครงสร้างโหลดไดโอดเล็กทรอนิกส์.....	68
รูปที่ 4.29 การวางตำแหน่งโหลดไดโอดเล็กทรอนิกส์ภายในสายอากาศปากแตรรูปกรวย.....	68
รูปที่ 4.30 โครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีใส่โหลดไดโอดเล็กทรอนิกส์ที่ จำลองการออกแบบด้วยโปรแกรม CST.....	69
รูปที่ 4.31 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของโหลดไดโอดเล็กทรอนิกส์ ที่รัศมี (R_D) ขนาดต่างๆ.....	70
รูปที่ 4.32 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของโหลดไดโอดเล็กทรอนิกส์ ที่ขนาดความหนา (H_D) ต่างๆ.....	71
รูปที่ 4.33 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของโหลดไดโอดเล็กทรอนิกส์ ที่ตำแหน่งระยะการวางโหลดไดโอดเล็กทรอนิกส์ (S_D) ห่างจากจุดศูนย์กลางเฟส.....	72
รูปที่ 4.34 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศปากแตร รูปกรวยขนาดมาตรฐานกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน ในกรณีใส่ของโหลดไดโอดเล็กทรอนิกส์เข้าไปภายในสายอากาศ.....	73
รูปที่ 4.35 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานด้วยโปรแกรม CST ในรูปแบบ 3 มิติ ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานกรณีใส่โหลดไดโอดเล็กทรอนิกส์.....	73
รูปที่ 4.36 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวย ขนาดมาตรฐานกรณีใส่โหลดไดโอดเล็กทรอนิกส์.....	74
รูปที่ 4.37 โครงสร้างพื้นฐานตัวกลางแบบเส้นลวด.....	76

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.38 โครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่ทำการออกแบบ.....	77
รูปที่ 4.39 วงจรเรโซแนนซ์ที่เกิดจากโครงสร้างสื่อตัวกลางแบบเส้นลวด.....	77
รูปที่ 4.40 กราฟแสดงค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด ที่มีความถี่ต่าง ๆ.....	79
รูปที่ 4.41 รูปแบบการพิจารณาโครงสร้างของตัวกลางแบบเส้นลวดสำหรับทำงาน ร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวย.....	82
รูปที่ 4.42 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของรูปแบบโครงสร้างตัวกลาง แบบเส้นลวดสำหรับทำงานร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวย.....	82
รูปที่ 4.43 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด เมื่อติดตั้งร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวย.....	84
รูปที่ 4.44 การเปรียบเทียบผลการจำลองอัตราขยายของรูปแบบโครงสร้างตัวกลางแบบ เส้นลวดเมื่อทำการติดตั้งร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวย.....	84
รูปที่ 4.45 รูปแบบการพิจารณาระยะ S_w	85
รูปที่ 4.46 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับระยะตำแหน่งโครงสร้างตัวกลาง แบบเส้นลวดที่ห่างจากปากอะเพอร์เจอร์สายอากาศปากแตรรูปกรวย.....	86
รูปที่ 4.47 รูปแบบการพิจารณาชนิดของไดอิเล็กตริก.....	87
รูปที่ 4.48 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับชนิดของไดอิเล็กตริกที่วางกัน ระหว่างชั้นของแนวระนาบตัวกลางแบบเส้นลวด.....	88
รูปที่ 4.49 รูปแบบการพิจารณาจำนวนชั้นของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด.....	89
รูปที่ 4.50 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อทำการเพิ่มจำนวนชั้นของ โครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด.....	89
รูปที่ 4.51 โครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติอิมพีแดนซ์บนโครงสร้าง ตัวกลางแบบเส้นลวดที่นำเสนอ.....	90
รูปที่ 4.52 โครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่นำเสนอ.....	90
รูปที่ 4.53 โครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติอิมพีแดนซ์บนโครงสร้าง ตัวกลางแบบเส้นลวดที่ทำการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST.....	91
รูปที่ 4.54 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับระหว่างสายอากาศปากแตร มาตรฐานกับสายอากาศที่นำเสนอ.....	92

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.55 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบ 3 มิติของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้เทคนิคอภิวัดบนโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่นำเสนอ ที่ทำการจำลองการออกแบบด้วยโปรแกรม CST.....	93
รูปที่ 4.56 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้เทคนิคอภิวัดบนโครงสร้างสื่อตัวกลางแบบเส้นลวดที่นำเสนอ.....	94
รูปที่ 4.57 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ศึกษา 4 รูปแบบ.....	95
รูปที่ 5.1 สายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน.....	99
รูปที่ 5.2 กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อนระหว่างผลการจำลองและผลวัดทดสอบของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานต้นแบบ.....	100
รูปที่ 5.3 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนคลื่นนิ่งระหว่างผลการจำลองและผลวัดทดสอบสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน.....	100
รูปที่ 5.4 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานต้นแบบ.....	102
รูปที่ 5.5 วิธีการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐาน.....	103
รูปที่ 5.6 ผลการเปรียบเทียบอัตราขยายของสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐานในช่วงความถี่ตั้งแต่ 9 GHz -11 GHz.....	104
รูปที่ 5.7 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน.....	106
รูปที่ 5.8 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐาน.....	107
รูปที่ 5.9 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐาน.....	108
รูปที่ 5.10 สายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีสื่อโหลดไดอิเล็กตริก.....	109
รูปที่ 5.11 กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับระหว่างผลการจำลองและผลวัดทดสอบสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีสื่อโหลดไดอิเล็กตริกต้นแบบ.....	110
รูปที่ 5.12 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนคลื่นนิ่งระหว่างผลการจำลองและผลวัดทดสอบของสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีสื่อโหลดไดอิเล็กตริกต้นแบบ.....	111
รูปที่ 5.13 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีสื่อโหลดไดอิเล็กตริกต้นแบบ.....	112
รูปที่ 5.14 วิธีการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีสื่อโหลดไดอิเล็กตริก.....	113

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.15 ผลการเปรียบเทียบอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีใส่โหลด ไดโอดีเล็กทรอนิกส์ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 9 GHz -11 GHz.....	114
รูปที่ 5.16 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศ ปากแตรรูปกรวยกรณีใส่โหลดไดโอดีเล็กทรอนิกส์.....	115
รูปที่ 5.17 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศ ปากแตรรูปกรวยกรณีใส่โหลดไดโอดีเล็กทรอนิกส์.....	116
รูปที่ 5.18 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานระหว่างผลการจำลองและการวัดของ สายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีใส่โหลดไดโอดีเล็กทรอนิกส์.....	117
รูปที่ 5.19 สายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติของเสาอากาศโครงสร้างสี่ตัวกลาง แบบเส้นลวด.....	119
รูปที่ 5.20 กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศปากแตรรูปกรวย โดยใช้คุณสมบัติของเสาอากาศโครงสร้างสี่ตัวกลางแบบเส้นลวด.....	120
รูปที่ 5.21 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) ของสายอากาศปากแตรรูปกรวย โดยใช้คุณสมบัติของเสาอากาศโครงสร้างสี่ตัวกลางแบบเส้นลวด.....	120
รูปที่ 5.22 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้ คุณสมบัติของเสาอากาศโครงสร้างสี่ตัวกลางแบบเส้นลวด.....	122
รูปที่ 5.23 วิธีการวัดทดสอบการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวย โดยใช้คุณสมบัติของเสาอากาศโครงสร้างสี่ตัวกลางแบบเส้นลวดต้นแบบ.....	123
รูปที่ 5.24 แบบจำลองการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดย ใช้คุณสมบัติของเสาอากาศโครงสร้างสี่ตัวกลางแบบเส้นลวดต้นแบบ.....	124
รูปที่ 5.25 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าของ สายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติของเสาอากาศโครงสร้าง สี่ตัวกลางแบบเส้นลวด.....	125
รูปที่ 5.26 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กของ สายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติของเสาอากาศโครงสร้าง สี่ตัวกลางแบบเส้นลวด.....	126
รูปที่ 5.27 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานในของสายอากาศปากแตรรูปกรวย โดยใช้คุณสมบัติของเสาอากาศโครงสร้างสี่ตัวกลางแบบเส้นลวด.....	127

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.28 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานในของสายอากาศปากแตรรูปกรวย โดยใช้คุณสมบัติของทิวสตูนโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด.....	129
รูปที่ 6.1 สายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติของทิวสตูนโครงสร้างตัวกลาง แบบเส้นลวดที่สมบูรณ์.....	132



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เทคโนโลยีด้านการสื่อสารโทรคมนาคมไร้สายหรือการติดต่อสื่อสารระยะไกลด้วยสัญญาณไมโครเวฟ (microwave signal) นับว่าเป็นหัวข้อที่นักวิจัยทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมให้ความสนใจและได้มีการศึกษาพัฒนาอย่างต่อเนื่อง อย่างเช่นการเชื่อมต่อสัญญาณไมโครเวฟด้วยสถานีทวนสัญญาณ การเชื่อมต่อสัญญาณไมโครเวฟผ่านระบบดาวเทียม หรือระบบเรดาร์ เป็นต้น ซึ่งในการเชื่อมต่อสัญญาณไมโครเวฟนั้นองค์ประกอบหนึ่งที่มีความสำคัญมากในการเชื่อมต่อสัญญาณไมโครเวฟระหว่างต้นทางกับปลายทางคือสายอากาศ (antenna) โดยในการเชื่อมต่อสัญญาณไมโครเวฟนั้นถ้าหากสายอากาศที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณมีอัตราขยายที่สูงก็จะส่งผลดีต่อการรับส่งสัญญาณเป็นอย่างมาก ดังนั้นนักวิจัยทางด้านวิศวกรรมสายอากาศส่วนใหญ่จึงมีการวิจัยพัฒนาและคิดค้นวิธีหรือนำเทคโนโลยีใหม่มาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศให้สูงขึ้นจากเดิมและเหมาะสมกับประเภทของการใช้งานในรูปแบบต่างๆ ในการเชื่อมต่อสัญญาณ

สายอากาศปากแตร (Horn antennas) ถือได้ว่าเป็นสายอากาศที่นิยมใช้มากในงานเชื่อมต่อสัญญาณไมโครเวฟ เนื่องจากสายอากาศปากแตรมีจุดเด่นที่สำคัญคือมีอัตราขยายสูง (High Gain), พูหลังต่ำ (Low Back lobe), โครงสร้างไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการสร้าง และข้อดีอีกประการหนึ่งคือ ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศปากแตรจะขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ของตัวป้อน (feeder) ทำให้ง่ายต่อการแมตช์ซึ่งสายอากาศ นอกจากนี้คุณสมบัติอีกประการหนึ่งของสายอากาศปากแตรคืออัตราขยายจะขึ้นอยู่กับขนาดและความยาวของสายอากาศ กล่าวคือสายอากาศปากแตรยังมีขนาดใหญ่ อัตราขยายของสายอากาศก็จะยิ่งสูงขึ้นตาม (Nafati *et al.*, 2013) ดังนั้นถ้าหากต้องการอัตราขยายที่สูงขนาดของสายอากาศปากแตรก็จะมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากตามซึ่งถือได้ว่าเป็นข้อเสียหลักของสายอากาศประเภทนี้ แต่สายอากาศปากแตรก็ยังคงเป็นสายอากาศที่ตอบสนองต่อความต้องการสายอากาศที่มีอัตราขยายสูงเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศประเภทอื่น (Mustafa *et al.*, 2014) ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาและออกแบบสายอากาศกันอย่างต่อเนื่องโดยมีจุดประสงค์หลักคือเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีอัตราขยายสูง พูข้างต่ำ พูหลังต่ำ โครงสร้างไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการสร้าง ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ง่ายต่อการติดตั้งและมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง ดังนั้นนักวิจัยทางวิศวกรรมสายอากาศจึงได้มีการคิดค้นวิธีการหรือนำเอาเทคโนโลยีใหม่ๆเข้ามาเพื่อช่วยในพัฒนาและออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศ

อภิวัด (Metamaterials) ถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจในการนำมาวิจัย และพัฒนาในงานด้านความถี่ไมโครเวฟซึ่งอภิวัดมีคุณสมบัติพิเศษทางด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดย เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษซึ่งไม่ปรากฏในตามธรรมชาติ คือมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (permittivity) เป็นลบหรือเข้าใกล้ศูนย์ อภิวัดได้ถูกนิยามว่าเป็นวัสดุประดิษฐ์เชิงวิศวกรรม (artificial material) โดยคุณสมบัติดังกล่าวของอภิวัดจะเกิดจากการออกแบบการจัดเรียงโครงสร้าง วัสดุขนาดเล็กมากๆ ซึ่งจากคุณสมบัติการออกแบบดังกล่าวทำให้เกิดการวิจัยออกแบบออกแบบ โครงสร้างของวัสดุเพื่อทำให้เกิดคุณสมบัติของอภิวัดในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้มีความเหมาะสมกับการ ประยุกต์ใช้งาน การนำโครงสร้างอภิวัดมาช่วยในการออกแบบและพัฒนาสายอากาศจึงกลายมาเป็น เทคโนโลยีใหม่ที่นักวิจัยได้ให้ความสนใจในการนำมาพัฒนาและออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของ สายอากาศสมัยใหม่

จากที่กล่าวมาข้างต้นในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาสายอากาศสายอากาศ ปากแตรรูปกรวย (Conical Horn Antenna) โดยใช้คุณสมบัติอภิวัดในรูปแบบโครงสร้างตัวกลาง แบบเส้นลวด (Wire Medium Structure) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศปากแตรรูปกรวยที่ย่าน ความถี่ X- Band (10 GHz) จากโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดนั้นถือได้ว่าเป็นโครงสร้างที่มี คุณสมบัติทางด้านอภิวัดหรือเรียกได้ว่าเป็นชนิดของวัสดุช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic band gap material) (Antonio *et al.*, 2013) ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการใช้โครงสร้างที่เรียบง่ายของตัวกลางแบบเส้นลวดในการเพิ่ม ประสิทธิภาพสายอากาศปากแตรรูปกรวย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการพัฒนาและออกแบบสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้เทคนิค อภิวัดที่อยู่ในรูปแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดสำหรับระบบเชื่อมต่อสัญญาณไมโครเวฟ (Microwave Link) ของสถานีทวนสัญญาณ

1.2.2 ออกแบบและจำลองผลสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้เทคนิคอภิวัดในรูปแบบ โครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST Microwave Studio

1.2.3 สร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลของการวัดทดสอบและผลที่ได้จาก การจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST Microwave Studio

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลและเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศปากแตรรูป กรวยที่ใช้ในระบบเชื่อมต่อสัญญาณไมโครเวฟของสถานีรับส่งสัญญาณ

1.3.2 ออกแบบสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้เทคนิคอภิวัดที่อยู่ในรูปแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพโดยการจำลองการออกแบบสายอากาศปากแตรด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio

1.3.3 สร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลวัดทดสอบและผลที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้สายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้เทคนิคอภิวัดในรูปแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่ความถี่ย่าน X-Band (10 GHz) ที่มีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้น

1.4.3 ได้สายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้เทคนิคอภิวัดในรูปแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดต้นแบบที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง

1.4.2 ใ้ต้องค้ความรู้ใหม่ในการศึกษาและพัฒนาต่อไป



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

สายอากาศปากแตรถือได้ว่าเป็นสายอากาศที่มีคุณสมบัติให้อัตราขยายสูง ซึ่งสายอากาศประเภทนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการสื่อสารที่ต้องการอัตราขยายสูงๆ เช่นการเชื่อมต่อสัญญาณไมโครเวฟด้วยสถานีทวนสัญญาณ การเชื่อมต่อสัญญาณไมโครเวฟผ่านระบบดาวเทียม หรือระบบเรดาร์ เป็นต้น วัตถุประสงค์หลักในงานวิจัยนี้คือ การคิดค้นและพัฒนาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศปากแตรรูปกรวย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องดำเนินการสำรวจและศึกษาปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงกล่าวถึงปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของสายอากาศปากแตร การประยุกต์ใช้งานอภิวัดร่วมกับสายอากาศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศให้ดียิ่งขึ้น เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระเบียบวิธีที่เคยถูกนำมาใช้ ผลการดำเนินการวิจัย ตลอดจนข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อที่จะนำไปสู่วัตถุประสงค์หลักที่ได้ตั้งไว้ โดยฐานข้อมูลที่ใช้ในการสืบค้นงานวิจัยนั้นเป็นฐานข้อมูลที่มีชื่อเสียงและได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง เช่นฐานข้อมูล IEEE และฐานข้อมูล IEICE นอกจากนี้ยังได้ทำการสืบค้นงานวิจัยจากแหล่งอื่น ๆ เช่น จากห้องสมุดของมหาวิทยาลัยต่าง ๆ ทั้งในและต่างประเทศ ผลการสืบค้นที่ได้จะใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อไป

2.2 สายอากาศปากแตร (Horn Antennas)

สายอากาศปากแตรถือได้ว่าเป็นสายอากาศที่นิยมใช้งานในการรับส่งสัญญาณความถี่ย่านไมโครเวฟเป็นสายอากาศแบบอะเพอร์เจอร์ (aperture antenna) ซึ่งสายอากาศปากแตรมีคุณสมบัติที่เป็นจุดเด่นคือ การให้อัตราขยายที่สูงและให้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ต่ำมาก นอกจากนี้ยังให้ความกว้างแถบค่อนข้างกว้างและที่สำคัญสามารถออกแบบแลสร้างได้โดยง่าย สำหรับงานวิจัยออกแบบพัฒนาสายอากาศปากแตรได้มีการคิดค้นขึ้นมาตั้งแต่ในสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการรับส่งคลื่นไมโครเวฟกำลังส่งสูง นับตั้งแต่นั้นมาสายอากาศปากแตรก็ได้ถูกพัฒนาโครงสร้างและประสิทธิภาพมาจนถึงปัจจุบัน โดยมีการออกแบบพัฒนาวิจัยรูปแบบของสายอากาศปากแตรให้มีประสิทธิภาพตรงต่อการประยุกต์ใช้งาน สายอากาศปากแตรที่นิยมใช้งานในปัจจุบันมี 2 ชนิด คือสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (rectangular horn antenna) และสายอากาศปากแตรรูปกรวย (conical horn antenna) ซึ่งในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อการพัฒนา

สายอากาศปากแตร (horn antenna) เพื่อใช้งานสำหรับการเชื่อมต่อสัญญาณไมโครเวฟ (microwave link) ด้วยสถานีทวนสัญญาณ, การรับส่งสัญญาณดาวเทียม และระบบเรดาร์ (radar) และอีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นสายอากาศส่วนป้อน (feed antenna) ให้กับสายอากาศแบบตัวสะท้อน (reflector antenna) สายอากาศปากแตรรูปกรวยถือได้ที่มีการวิจัยและพัฒนาโดยการนำเทคโนโลยีต่างๆ มาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพ เนื่องด้วยสายอากาศปากแตรมีโครงสร้างที่ค่อนข้างเป็นมาตรฐานและเป็นที่ทราบกันดีว่าอัตราขยายและสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศปากแตรจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดความยาวและมุมกางของอะเพอร์เจอร์ โดยถ้าความยาวและมุมกางของอะเพอร์เจอร์เพิ่มขึ้นอัตราขยายและสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศปากแตรก็จะเพิ่มขึ้นตามด้วย แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มขนาดความยาวและมุมกางของอะเพอร์เจอร์สายอากาศปากแตรก็มีขีดจำกัดในการเพิ่มเพื่อให้ได้อัตราขยายซึ่งมุมกางอะเพอร์เจอร์ที่จะทำให้ประสิทธิภาพดีที่สุดคือประมาณ 50 องศาและความยาวของสายอากาศปากแตรต้องมีความสัมพันธ์กับมุม ซึ่งจากการวิเคราะห์ถ้าสายอากาศปากแตรมีความยาวเพิ่มสูงขึ้นมุมกางอะเพอร์เจอร์ที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพสายอากาศที่ดีก็จะมีขนาดของมุมกางที่ลดต่ำลง (G.C.Southworth, A.P.King, 1939) และจากทฤษฎีได้มีการวัดคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตรรูปกรวยเพื่อยืนยันทฤษฎีของ Gray and Schelkunoff ที่ได้กำหนดมาตรฐานของขนาดความยาวและของอะเพอร์เจอร์ที่สัมพันธ์ต่ออัตราขยายของสายอากาศปากแตร โดยทำการวิเคราะห์ถึงพื้นที่ประสิทธิผลสายอากาศโดยเมื่อทำการกำหนดค่าความกว้างอะเพอร์เจอร์คงที่และทำการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของสายอากาศปากแตร จากการวิเคราะห์พบว่ายิ่งความยาวของสายอากาศปากแตรยิ่งสูงขึ้นค่าพื้นที่ประสิทธิผลสายอากาศก็จะสูงตาม แต่ค่าพื้นที่ประสิทธิผลที่สูงที่สุดของสายอากาศปากแตรรูปกรวยจะมีค่าสูงสุดประมาณ 84% (A.P.King, 1950) จากทฤษฎีและมาตรฐานขนาดและโครงสร้างของสายอากาศปากแตรรูปกรวยที่เป็นรูปแบบพื้นฐานที่ได้ถูกวิจัยและพัฒนาจนได้มาตรฐาน ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการออกแบบพัฒนาสายอากาศชนิดนี้ซึ่งก็ได้มีนักวิจัยและพัฒนาสายอากาศได้ทำการนำคุณสมบัติดังกล่าวมาพัฒนาสายอากาศให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นกว่าเดิมและเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของสายอากาศที่เหมาะสมกับการใช้งานในด้านต่าง ๆ ซึ่งการพัฒนาดังกล่าวได้แก่ การออกแบบสายอากาศปากแตรขนาดกะทัดรัดที่ใช้สำหรับรับสัญญาณ C-Band สำหรับสถานีรับสัญญาณดาวเทียมภาคพื้นดิน (Christophe Granel, 2003) โดยสายอากาศปากแตรที่พัฒนาคือสายอากาศปากแตรแบบลูกฟูก (corrugated horn) เพื่อมีจุดประสงค์ในการนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับเป็นสายอากาศป้อนให้กับสายอากาศแบบตัวสะท้อนพาราโบลา (parabolic reflector antenna) โดยการพัฒนาใช้เทคนิคการปรับลดขนาดความยาวของสายอากาศลงแล้วทำการเพิ่มความกว้างของอะเพอร์เจอร์สายอากาศ และจุดเด่นที่สำคัญคือ ทำการออกแบบรูปทรงของสายอากาศปากแตรเป็นแบบลูกคลื่น จากเทคนิคดังกล่าวสามารถลดความยาวสายอากาศลงเหลือประมาณ 61% อีกทั้งยังทำ

ให้ได้อัตราขยายและประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบเดิม แต่การออกแบบสายอากาศปากแตรแบบลูกฟูกมีข้อเสียคือการสร้างนั้นมีความยุ่งยาก ในการพัฒนาสายอากาศปากแตรอีกรูปแบบหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาคือโดยการเพิ่มโครงสร้างด้วยเทคนิคต่าง ๆ เข้าไปเพื่อให้สายอากาศที่ออกแบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้น เช่น การพัฒนาสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยการเพิ่มช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าของระบบป้อนของสายอากาศแบบสะท้อนในย่านความถี่ Ka Band (R.Chantalat *et al.*, 2008) ในการพัฒนาสายอากาศนี้ได้ใช้สายอากาศปากแตรรูปกรวยเป็นตัวกระตุ้นแล้วทำการออกแบบชุดโพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Band Gap : EBG) โดยออกแบบให้ EBG ในรูปแบบร่องวงกลมเรียงกันอย่างเป็นลำดับมาวางด้านหน้าสายอากาศปากแตร ซึ่งจากเทคนิคดังกล่าวสามารถเพิ่มขนาดความกว้างแถบความถี่ (bandwidth) และสามารถลดพู่ข้าง (side lobe) อีกทั้งเพิ่มอัตราขยายได้ถึง 24 dB อย่างไรก็ตามข้อเสียของงานวิจัยนี้ต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายในการสร้างและวัสดุที่ใช้ในการสร้างหาได้ยาก แต่ถือได้ว่าเทคนิคดังกล่าวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศจากเดิมถึง 70% ต่อมาได้มีการทำการนำสายอากาศปากแตร 2 แบบมาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติกัน ได้แก่สายอากาศปากแตรรูปกรวย (conical horn antenna) และสายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบลูกฟูก (corrugated conical horn antenna) โดยเลือกพิจารณาสายอากาศที่ความถี่กลาง 10 GHz พบว่าสายอากาศปากแตรรูปกรวยแบบลูกฟูกสามารถลดพู่ข้างได้ดี (Petr Piksa, 2011) จากการออกแบบสายอากาศปากแตรรูปกรวยที่ผ่านมานั้นส่วนใหญ่ตัวกระตุ้น (feed) จะอยู่ในรูปแบบท่อนำคลื่นทรงกระบอกเท่านั้น ต่อมา Huanbin Jiang *et al.* (2012) ได้ออกแบบสายอากาศปากแตรรูปกรวยสำหรับย่านความถี่ R-Bandโดยใช้ตัวกระตุ้นแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก (rectangle waveguide) จากเทคนิคนี้สามารถเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศโดยเพิ่มความกว้างอะเพอร์เจอร์ จุดเด่นของสายอากาศนี้คือ มีความกว้างแถบความถี่เพิ่มขึ้น (wide bandwidth) มีแบบรูปการแผ่พลังงานดีขึ้นและระดับพู่ข้างต่ำ

การพัฒนาเพื่อให้ได้เทคนิคที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศได้ถูกวิจัยพัฒนาต่อเนื่องการนำวัสดุในรูปแบบต่าง ๆ มาวางขวางหน้าอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตรก็ถือได้ว่าเป็นอีกเทคนิคที่นิยมนำมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศ โดยในยุคแรกการประยุกต์การนำวัสดุไดอิเล็กตริกมาใส่เพิ่มภายในโครงสร้างสายอากาศปากแตรโดยเริ่มจากการนำเสนอกำหนดไอเล็กตริกแบบแผ่นจาน (dish) ทำให้สามารถเพิ่มอัตราขยายได้ประมาณ 1.5 dB (M.Clenet *et al.*, 1998) ซึ่งการนำเสนอนี้ถือได้ว่าเป็นยุคแรกที่เริ่มนำเทคนิคการใส่แผ่นโลหะแบบรูปดังก้าวเข้าไปภายในสายอากาศ ต่อจากนั้นได้มีการนำเสนอกำหนดไอเล็กตริกแบบรูปกรวยโดยการใส่วัสดุไดอิเล็กตริกแบบรูปแผ่นจานภายในสายอากาศโดยทำการเปรียบเทียบระหว่างการใส่วัสดุไดอิเล็กตริกแบบรูปแผ่นจานเพียง 1 ชั้นกับ 3 ชั้น โดยการใส่วัสดุไดอิเล็กตริกแบบรูปแผ่นจานจำนวน 3 ชั้น จะสามารถช่วยให้อัตราขยายที่ความถี่ต่ำเพิ่มขึ้น และโดยรวมการใส่วัสดุแบบรูปแผ่น

งานทำให้สามารถเพิ่มอัตราขยายขึ้นอีกประมาณ 3 dB อีกทั้งยังมีรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นที่ดีขึ้น (C.Y.Tan *et al.*, 2007) ต่อมาหลังจากนั้นได้มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบวัสดุไดอิเล็กตริกที่ใส่เข้าไปภายในสายอากาศแต่ไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศได้แต่สามารถแก้ไขข้อคลื่นตัดขวาง (Cross Polarization) ให้ดีขึ้นแต่อัตราขยายลดลง (C.Y.Tan *et al.*, 2009) จากวิธีการที่ผ่านมาไม่สามารถทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของสายอากาศดีขึ้น จึงได้ทำการปรับรูปแบบของวัสดุไดอิเล็กตริกเป็นรูปทรงรีใส่เพิ่มเข้าไปภายในสายอากาศพบว่าสามารถทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมดีขึ้นทั้งอัตราขยาย การลดระดับพู่ข้างและสามารถแก้ไขข้อคลื่นตัดขวาง (C.Y.Tan *et al.*, 2009) จากการพัฒนาสายอากาศปากแตรโดยการเพิ่มวัสดุไดอิเล็กตริกเข้าไปในสายอากาศก็ได้มีการพัฒนารูปแบบวัสดุไดอิเล็กตริกอย่างต่อเนื่อง โดย E.Doumanis *et al.* (2013) ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศปากแตรรูปรวยโดยเพิ่มแผ่นวัสดุรูปก้นหอยวางหน้าอะเพอร์เจอร์ โดยทำการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานกับสายอากาศปากแตรแบบเดิม จากเทคนิคดังกล่าวพบว่าผลที่ได้มีค่าประสิทธิภาพของสายอากาศใกล้เคียงสายอากาศแบบเดิม

2.3 อภิวัด (Metamaterials)

ในปัจจุบันนี้การพัฒนาสายอากาศได้มีการนำเทคโนโลยีใหม่ๆ เข้ามาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศอย่างต่อเนื่อง อภิวัด (metamaterials) ถือได้ว่าเป็นอีกเทคโนโลยีที่เริ่มเป็นที่นิยมในช่วงระยะเวลาที่ผ่านมาไม่นานนี้ อภิวัดถูกนิยามไว้ว่าเป็นวัสดุประดิษฐ์เชิงวิศวกรรมซึ่งมีคุณสมบัติที่ไม่ปรากฏตามธรรมชาติ โดยคุณสมบัติของวัสดุเหล่านี้จะเกิดจากการจัดเรียง (composition) และการผนวกกันของวัสดุขนาดเล็กโดยมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นมากๆ จากการผนวกกันของวัสดุดังกล่าวที่มีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน (inhomogeneous) เพื่อทำให้เกิดคุณสมบัติประสิทธิผลในระดับมาโคร (macroscopic) การประยุกต์ใช้อภิวัดสำหรับสายอากาศเริ่มมีจำนวนมากขึ้น เนื่องจากอภิวัดมีคุณสมบัติพิเศษคือ มีค่าดัชนีหักเหเป็นลบ มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าหรือค่าซึมซาบแม่เหล็กเป็นลบหรือมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ (ศราวูธและประยุทธ, 2011) ที่ผ่านมามีการออกแบบโครงสร้างอภิวัดในรูปแบบต่างๆ เพื่อนำมาใช้ในการพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศหลากหลายประเภท อีกทั้งงานวิจัยทางด้านความถี่ไมโครเวฟ อภิวัดถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากมีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถทำงานทางด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของอภิวัดที่มีผลต่อคลื่นความถี่ไมโครเวฟคือสามารถลดความเร็วคลื่นที่ผ่านโครงสร้างอภิวัด (Zhou *et al.*, 2010) ในการออกแบบและพัฒนาสายอากาศปากแตรก็ได้มีการนำคุณสมบัติของอภิวัดมาใช้ในการเพิ่มและปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศเช่นกัน โดย Davide Ramaccia *et al.* (2013) ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศปากแตรขนาดกะทัดรัดโดยใช้อภิวัดที่มีคุณสมบัติค่าคงตัวไดอิเล็กตริกมีค่าใกล้เคียงศูนย์หรือมีค่าติดลบมาวางในลักษณะเลนส์ ซึ่ง

ทำการออกแบบโดยทำการลดขนาดความยาวของสายอากาศปากแตรลงมาครึ่งหนึ่งจากความยาวสายอากาศมาตรฐานแล้วทำการออกแบบโครงสร้างวัสดุเพื่อให้มีคุณสมบัติเป็นอภิวัดโดยมีโครงสร้างเป็นเส้นลวดวางเรียงกันในรูปโครงข่ายสี่เหลี่ยมสามชั้น จากการทดสอบพบว่าสายอากาศที่นำเสนอมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับสายอากาศปากแตรมาตรฐาน แต่จุดเด่นของเทคนิคนี้คือสามารถลดขนาดของสายอากาศปากแตรให้มีขนาดเล็กลงแต่ยังคงประสิทธิภาพสายอากาศใกล้เคียงกับสายอากาศมาตรฐาน หลังจากนั้น Mustafa *et al.* (2014) ได้นำเสนอการนำคุณสมบัติโครงสร้างอภิวัดมาใช้เพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศปากแตรรูปรวยโดยการออกแบบได้ทำการลดขนาดความยาวของสายอากาศปากแตรรูปรวยลงมาครึ่งหนึ่งแล้วออกแบบโครงสร้างอภิวัดที่อยู่ในรูปแบบไดอิเล็กทริกเลนส์ ซึ่งรูปแบบของไดอิเล็กทริกเลนส์ได้ทำการออกแบบโดยการเจาะช่องว่างรูปทรงกระบอกเรียงกันเต็มพื้นที่แผ่นไดอิเล็กทริกโดยมีขนาดของช่องว่างที่แตกต่างกัน จากโครงสร้างดังกล่าวทำให้เกิดคุณสมบัติของอภิวัด จากเทคนิคดังกล่าวพบอัตราขยายของสายอากาศเพิ่มสูงขึ้นแต่ความกว้างแถบความถี่ที่ได้ไม่ดีเท่าที่ควร ต่อมา Mario Reyes-Ayala *et al.* (2014) ได้มีการนำเสนอการเพิ่มโหนดไดอิเล็กทริกเข้าไปภายในโครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปรวยเพื่อประยุกต์ใช้กับระบบสื่อสารดาวเทียมโดยวิธีการนำเสนอโดยการใส่โหนดไดอิเล็กทริกรูปทรงกระบอกเข้าไปกั้นระหว่างโครงสร้างของสายอากาศปากแตรรูปรวย จากเทคนิคดังกล่าวทำให้ได้อัตราขยายของสายอากาศสูงเพิ่มขึ้น และขนาดความหนาของไดอิเล็กทริกที่เหมาะสมทำให้พู่ข้างและพู่หลังต่ำ อีกทั้งแบบรูปการแผ่พลังงานดีขึ้น จากปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นเป็นวิวัฒนาการของการพัฒนาสายอากาศปากแตรรูปรวยจากอดีตมาจนถึงปัจจุบัน จะสังเกตได้ว่าในปัจจุบันการพัฒนาสายอากาศปากแตรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานนั้นส่วนใหญ่จะใช้เทคนิคในการเพิ่มไดอิเล็กทริกหรือวัสดุเข้าไปภายในสายอากาศ

2.4 ช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Band Gap: EBG)

เป็นที่ทราบกันดีว่าอภิวัดนั้นเกิดจากโครงสร้างวัสดุที่จัดเรียงในรูปแบบต่างๆให้เกิดคุณสมบัติอภิวัด ซึ่งรูปแบบของโครงสร้างของอภิวัดนั้นได้ถูกพัฒนาในหลากหลายรูปแบบและหลายประเภท ช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าก็เป็นโครงสร้างอีกชนิดหนึ่งของอภิวัด การนำ EBG มาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศได้มีการวิจัยพัฒนาอย่างต่อเนื่องเช่นกันโดยทำการประยุกต์กับสายอากาศประเภทต่าง ๆ สำหรับการประยุกต์ใช้โพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อลดหรือขจัดคลื่นผิวของสายอากาศนั้น อาจทำได้โดยการออกแบบให้ EBG ล้อมรอบสายอากาศ ไมโครสตรัทแบบแพทช์เพื่อเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศและลดระดับของพู่คลื่นด้านหลัง (R. Coccioli *et al.*, 1999) หรือในการออกแบบสายอากาศสำหรับระบบระบุตำแหน่งบนพื้นโลก GPS โดยใช้ EBG แทนที่โซ่ควงกลมหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น (quarter-wavelength choke rings) (W. E. McKinzie *et*

al., 2002) และสำหรับสายอากาศแถวลำดับที่มีการเพิ่ม EBG เข้าไปจะช่วยลดระดับการเชื่อมต่อร่วม (mutual coupling level) ได้ด้วย อีกเทคนิคการประยุกต์นำ EBG ใช้คือ ออกแบบให้ EBG ครอบคลุมไว้ข้างหน้าสายอากาศกระตุ้นโดยหลักๆ แล้ว EBG ที่เหมาะกับการกระตุ้นจากด้านหลังคือ EBG รูปแบบคล้ายกองฟืน (woodpile EBG) ซึ่งเป็น EBG แบบ 3 มิติ มีการวิจัยพัฒนาโดยการใช้โพรง EBG แบบ 3 มิติในการออกแบบสายอากาศโมโนโพล (monopole antenna) ให้มีลำคลื่นที่แคบ (narrow-beam) เพื่อเพิ่มอัตรายายของสายอากาศให้สูงขึ้น สำหรับการประยุกต์ใช้งานในแถบความยาวคลื่นมิลลิเมตร (millimeter wave) ที่ความถี่ 95 GHz (Y. Lee *et al.*, 2009) โดยนำโพรง EBG ที่มีลักษณะเป็นแบบกองฟืนทรงกระบอก (cylindrical woodpile EBG) มาล้อมรอบสายอากาศแสดงดังรูปที่ 2.1 จากการวัดทดสอบพบว่าระบบสายอากาศมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half Power Beam Width หรือ HPBW) เท่ากับ 6.5° และมีอัตรายาย 5 dBi จากการใช้ EBG แบบสามมิติแบบกองฟืน มาใช้กับการเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศนั้น พบว่ามีข้อเสียคือการออกแบบวาง EBG ต้องมีระยะในการวางที่ห่างจากสายอากาศกระตุ้นที่เหมาะสมซึ่งโดยทั่วไปพบว่าระยะที่วางนั้นมีระยะห่างมากทำให้ขนาดของสายอากาศมีขนาดใหญ่มากขึ้นอีกทั้งมีปัญหาในการติดตั้งสายอากาศกระตุ้นกับตัว EBG อันที่จริงแล้วการใช้ EBG โดยการกระตุ้นจากด้านหลังนั้นได้มีการพัฒนากันมาก่อนหน้านี้แล้วแต่มักจะนิยมออกแบบบนโครงสร้าง EBG ให้มีรูปแบบคล้ายดอกเห็ดอาทิเช่น การออกแบบการเพิ่มอัตรายายและความกว้างแถบความถี่ของสายอากาศระนาบด้วยช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า 1 มิติ ได้มีการออกแบบส่วนกระตุ้นด้วยสายอากาศแบบแพทช์โดยออกแบบโครงสร้าง EBG โดยใช้โครงสร้างโลหะแผ่นทรงกลมที่มีความหนา $\lambda/4$ สองแผ่นวางห่างกันที่ระยะ $\lambda/4$ โดยโครงสร้างดังกล่าวอธิบายได้ว่าการวางโลหะสองแผ่นที่มีขนาดเท่ากันและมีระยะห่างที่สัมพันธ์กับความยาวคลื่นสามารถทำให้เกิดคุณสมบัติช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีอากาศเป็นไดอิเล็กตริก (Ludovic Leger *et al.*, 2005) ต่อมาได้มีการพัฒนารูปแบบของการนำ EBG มาใช้งานโดยมีการออกแบบการเพิ่มอัตรายายให้สูงขึ้นโดยใช้โครงสร้าง EBG โดยการเจาะช่องโลหะด้วยรูปทรงกระบอกเรียงกันเต็มพื้นผิวโลหะจากวิธีดังกล่าวทำให้ได้การแผ่กระจายคลื่นดีขึ้นโดยทำให้ความกว้างแถบความถี่แคบลงแต่ไม่ทำให้อัตรายายเพิ่มขึ้น (G.M.Sardi *et al.*, 2006) หลังจากนั้นได้มีการนำ EBG ที่อยู่ในรูปแบบคล้ายดอกเห็ดมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศโดยทำการวิเคราะห์หาระยะและรูปทรงที่เหมาะสมต่อการทำงานเพื่อให้ได้อัตรายายสูงขึ้นโดยนำ EBG รูปแบบคล้ายเห็ดมาวางขวางข้างหน้าสายอากาศป้อนโดยระยะห่างในการวางมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพที่ได้ (Yading Li, 2009) และจากเทคนิคดังกล่าวได้มีการพัฒนารูปแบบการออกแบบในลักษณะ EBG แบบแถบคู่เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในระบบป้อนให้กับสายอากาศตัวสะท้อน (reflector antenna) โดยใช้ในการรวมคลื่นโดยใช้เทคนิคการออกแบบเพื่อสามารถใช้งานได้ 2 ความถี่ ซึ่ง EBG ได้ถูกออกแบบขึ้นละความถี่แล้วมาวางในระยะเวลาห่างที่เหมาะสมจากเทคนิคดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ในระบบ

ป้อนให้กับสายอากาศสำหรับรับส่งสัญญาณดาวเทียม 2 ช่วงความถี่ (Ahmad Kanso *et al.*, 2010) จากเทคนิคดังกล่าวนี้ที่มียังกลุ่มเดิมได้ทำการปรับเปลี่ยนระบบการป้อนจากตัวป้อนชุดเดียวมาเป็นตัวป้อนแบบหลายตัว ซึ่งสามารถเพิ่มอัตราขยายได้ถึง 40 dB (Ahmad Kanso *et al.*, 2011) และต่อมา Amagoia Tellechea *et al.*, (2013) ได้นำเสนอการปรับรูปแบบของ EBG จากรูปสี่เหลี่ยมให้เป็นรูปทรงอื่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศทำให้ได้อัตราขยายที่เพิ่มขึ้น

2.5 ตัวกลางแบบเส้นลวด (Wire medium)

ตัวกลางแบบเส้นลวด (Wire Medium Structure) เป็นโครงสร้างที่มีคุณสมบัติทางด้านอภิวัดและเป็นชนิดของวัสดุช่องว่างแถบความถี่ (Burghignoli *et al.*, 2008) ครอบคลุมเดียวกับ EBG แบบสามมิติแบบกองพิน (Antonio *et al.*, 2013) โดยโครงสร้างของตัวกลางแบบเส้นลวดเกิดจากการจัดเรียงเส้นลวดขนาดเล็กขนานกันเป็นชั้นๆ ฝังตัวลงในตัวกลางไดอิเล็กตริก ซึ่งตัวกลางแบบเส้นลวดนี้ได้มีการศึกษาตั้งแต่ปี 1950 ตัวกลางแบบเส้นลวดเป็นที่ทราบกันดีว่าเป็นโครงสร้างวัสดุที่ถูกออกแบบมาใช้ในย่านความถี่พลาสมา (plasma frequency) และมีคุณสมบัติที่ทำให้เกิดค่ามีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าหรือค่าซึมซาบแม่เหล็กมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ (Forati *et al.*, 2008) การนำตัวกลางแบบเส้นลวดมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศนั้นได้ถูกนำเสนอโดย Tomaz *et al.* (2013) ซึ่งนำสื่อตัวกลางแบบเส้นลวดมาทำการปรับปรุงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรโดยทำการออกแบบตัวกลางแบบเส้นลวดที่ประกอบด้วยจำนวนชั้นของเส้นลวดที่วางเรียงกันจำนวนห้าชั้นโดยเส้นลวดถูกวางฝังอยู่ในไอไดอิเล็กตริกสไตโรโฟม (Styrofoam) จากผลการทดสอบพบว่าสามารถทำให้สภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศเพิ่มสูงขึ้นและลดระดับของพู่ข้างลงได้แต่ในขณะเดียวกันนั้นพบว่าอัตราขยายของสายอากาศมีค่าน้อยกว่าสายอากาศปากแตรแบบเดิม นอกจากนี้ Al-Nuaimi และคณะ (2014) ได้ทำการนำเสนอการพัฒนาสายอากาศปากแตรรูปโดยทำการลดขนาดความยาวของสายอากาศลงขณะที่ขนาดของปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศยังคงมีขนาดเท่าเดิมเพื่อทำการปรับปรุงสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยนำเทคนิคตัวกลางแบบเส้นลวดมาวางปิดปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตรรูปกรวย จากการทดสอบพบว่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศเพิ่มขึ้นและอัตราขยายของสายอากาศมีค่าใกล้เคียงกับสายอากาศแบบเดิมแต่สามารถลดขนาดของสายอากาศลงได้ครั้งหนึ่ง จากการศึกษาสามารถสรุปจุดเด่นของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดได้ว่าสามารถจัดส่วนประกอบของกราวด์เพลนเพื่อป้องกันการแพร่กระจายของคลื่นผิว (surface waves) อีกทั้งโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดนั้นมีโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อนและมีคุณสมบัติในการปรับปรุงประสิทธิภาพต่างๆ ของสายอากาศเช่น เพิ่มสภาพเจาะจงทิศทางให้สูงขึ้นเพิ่มอัตราขยายสายอากาศ อีกทั้งยังเพิ่มประสิทธิภาพแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมด ในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการนำคุณสมบัติของอภิวัดชนิดโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดมาทำการออกแบบร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวย ด้วยคุณสมบัติพิเศษของอภิวัดชนิดโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดนั้นเมื่อทำการออกแบบรูปแบบโครงสร้างและตำแหน่งการวางที่เหมาะสมแล้วจะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศปากแตรรูปกรวย ในการศึกษาสมรรถนะและผลกระทบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นแก่สายอากาศ นับว่าเป็นสิ่งสำคัญเพื่อช่วยในการแก้ปัญหาในการออกแบบวิเคราะห์และพัฒนาสายอากาศ อาทิเช่น อัตราขยายในทิศทางด้านหน้า ความกว้างแถบความถี่ใช้งาน ความกว้างของลำคลื่น แบบรูปการแผ่พลังงาน สภาพเจาะจงทิศทาง อิมพีแดนซ์ด้านเข้า และคุณสมบัติอื่น ๆ จึงมีงานวิจัยมากมายที่ได้นำเสนอการประยุกต์กรรมวิธี สมมติฐาน และทฤษฎีต่าง ๆ เพื่อให้การทำนายมีความแม่นยำหรือมีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น สามารถแสดงให้เห็นความเป็นมาของวิธีนี้โดยเรียงลำดับดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ลำดับการอ้างอิงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้นำเสนอ	เรื่อง	ปี
G.C.Southworth และ A.P.King	Metal Horns as Directive Receivers of Ultra-Short Wave	1939
A.P.King	The Radiation Characteristics of Conical Horn Antenna	1950
M.Clenet และL.Shafai	Gain Enhancement of Conical Horn by Introducing Bodies of Revolution inside the Horn	1998
Christophe Granet	Design of a Compact C-Band Receive-Only Horn for Earth Station Antenna G/T _A Performance	2003
Ludovic Leger, Thierry Monediere และ Bernard Jeeko	Enhancement of Gain and Radiation Bandwidth for a Planar 1-D EBG Antenna	2005
Mario G.Silveirinha และ Carlos A. Fernandes	Homogenization of 3-D-Connected and Nonconnected Wire Metamaterials	2005
G.M.Sardi, G.Donzelli, และ F.Capolino	High Directivity at Broadside with New Radiators made of Dielectric EBG Materials	2006

ผู้นำเสนอ	เรื่อง	ปี
Lukas Jelinek, Jan Machac, และ Jan Zehentner	Metamaterials- A Challenge for Contemporary Advanced Technology	2007
Pekka M.T. Ikonen, Elena Saenz, Ramon Gonzalo และSergei A.Tretyakov	Modeling and Analysis of composite Antenna Superstrates Consisting on Grids of Loaded Wires	2007
Yan Zhao, Pavel A.Belove และ Yang Hao	Modelling of Wave Propagation in wire media Using Spatially Dispersive Finite-Difference Time-Domain Method: Numerical Aspects	2007
R.Chantalat, C.Menuhier, M.Thevenot, T.Monediere, และ P.Dumon	Enhanced EBG Resonator Antenna as Feed of Reflector Antenna in the Ka Band	2008
Kenneth Brown, Chi-Chih Chen และ Walter D. Burnside	A Novel Design of a Miniature Wideband Corrugated Horn Antenna Employing Unique Sinusoidal Shaped Ridges	2008
Paolo Burghignoli, Giampiero Lavat, David R.Jackson และ Donald R.Wilton	Directive Leaky-Wave Radiation From a dipole Source in a Wire-Medium Slab	2008
Paolo Burghignoli, Giampiero Lavat, Filippo Capolino, และDonald R.Wilton	Modal Propagation and Excitation on a Wire- Medium Slab	2008

ผู้นำเสนอ	เรื่อง	ปี
Giampiero Lovat	Near-Field Shielding Effectiveness of 1-D Periodic Planar Screens With 2-D Near-Field Sources	2009
Yading Li	Investigation of minimum Cavity Height of Small EBG-Resonator Antennas For Maximum Directivity	2009
Syed Azhar Hasan	Design & Measurements Techniques for Circularly Polarized, Dual Fed, High Gain, Lightweight, Wideband Conical Horn Antenna with Suppressed Side Lobe & High Performance Radome for Space Application	2010
Rongguo Zhou, Hualiang Zhang, และ Hao Xin	Metallic Wire Array as Low-Effective Index of Refraction Medium for Directive Antenna Application	2010
Admad Kanso, R.Chantalat, M.thevenot, E.Arnaud, และ T.Monediere	Offset Parabolic Reflector Antenna Fed by EBG Dual-Band Focal Feed for Space Application	2010
Rongguo Zhou, Hualiang Zhang, และ Hao Xin	Metallic Wire Array as Low-Effective Index of Refraction Medium for Directive Antenna Application	2010
Marek S.Wartak, Kosmas L.Trakmakidis และOrtwin Hess	Introduction to Metaterials	2011
ศราวุธและประยูทธ	อภิวัดสำหรับประยุกต์ใช้ด้านสายอากาศ	2011
Petr Piksa	Comparison of Conical Horn with Optimized Corrugated Surface and Corrugated Horn	2011
Huanbin Jiang, Wanshun Jiang และ Yuemin Ning	Design of Novel R-Band Conical Horn Antenna Fed with Rectangle Waveguide	2012

ผู้นำเสนอ	เรื่อง	ปี
Ahmet Serdar Turk และ Ahmer Kenan Keskin	Partially Dielectric-Loaded Ridged Horn Antenna Design for Ultrawideband Gain and Radiation Performance Enhancement	2012
E.Doumanis, D.Zelenchuk, V.Fusco และ G.Goussetis	Conical Horn Antenna with Spiral Phase Plate for Difference Pattern Generation	2013
Nafati A. Aboerwal, Constantine A.Balanis และ Craig R.Birtcher	Conical Horn: Gain and Amplitude Patterns	2013
Davide Ramaccia, Francesco Scattone, Filiberto Bilotti, และ Alessandro Toscano	Broadband Compact Horn Antennas by Using EPS- ENZ Metamaterial Lens	2013
Amagoia Tellechea, Juan Carlos Iriarle, Inigo Ederra, และ Antonio Montesano	Dual Band Compact and Light EBG Superstrate Based Antenna for TT&C Application	2013
Ebrahim Forati และ George W.Hanson	Scattering From Isotropic Connected Wire Medium Metamaterials: Three-, Two-, and One-Dimensional Cases	2013
Mustafa K, Taher Al-Nuaimi, และ Wei Hong	Discrete Dielectric Reflectarray and Lens for E-Band With Different Feed	2014

ผู้นำเสนอ	เรื่อง	ปี
Mustafa K, Taher Al-Nuaimi, Wei Hong, และ Yan Zhang	Design of high-Directivity Compact-Size Conical Horn Lens Antenna	2014
Mario Reyes-Ayala และ Hildeberto Jardon-Aguilar	Dielectric Load in short Standard Conical Horns for Satellite Application	2014
Zhun Yang, Wei Song, และ Xin-Qing Sheng	A Modified PML in FDTD Modeling of a Uniaxial Wire Medium	2014
Tiago A.Morgado, Jorge M.Alves, Joao S.Marcos, Stanislav I.Maslovski, Carlos A.Fernandes, และ Mario G.Silveirinha	Spatially Confined UHF RFID Detection with a Metamaterial Gride	2014
Sergei Kosulnikov, Dmitry Filonov, Stanislav Glybovski, Pavel Below, Sergei Tretyakov, และ Constantin Simovski	Wire-Medium Hyperlens for Enhancing Radiation From Subwavelength Dipole Sources	2015
Ebrahim Forati และ George W.Hanson	An Epsilon-Near-Zero Total-Internal-Reflection Metamaterial Antenna	2015

2.6 สรุป

ตามเนื้อหาที่กล่าวในบทนี้ได้อธิบายถึงการพัฒนาสายอากาศปากแตรด้วยเทคนิคต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศในด้านต่าง ๆ เพื่อให้ตรงตามความต้องการต่อการประยุกต์ใช้งาน เนื่องด้วยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อพัฒนาสายอากาศปากแตรที่เหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้เป็นสายอากาศสำหรับระบบเรดาร์และการเชื่อมต่อสัญญาณไมโครเวฟด้วยสถานีทวนสัญญาณ โดยจากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอการออกแบบสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยนำจุดเด่นของเทคนิคอภิวัดมาประยุกต์ทำงานร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวย ซึ่งมีแนวคิดในการนำเทคนิคอภิวัดที่อยู่ในรูปแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดมาทำการติดตั้งที่ตำแหน่งปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยทำการออกแบบและวิเคราะห์ลักษณะรูปแบบโครงสร้างและระยะตำแหน่งการวางที่เหมาะสม เนื่องจากอภิวัดมีคุณสมบัติพิเศษคือ มีค่าดัชนีหักเหเป็นลบ มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าหรือค่าซิมซาบแม่เหล็กเป็นลบ หรือมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เมื่อมีการแผ่กระจายกำลังจากสายอากาศปากแตรผ่านโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีคุณสมบัติของอภิวัดจะช่วยให้อัตราขยายของสายอากาศเพิ่มขึ้น อีกทั้งสามารถช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศให้ดีขึ้น

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

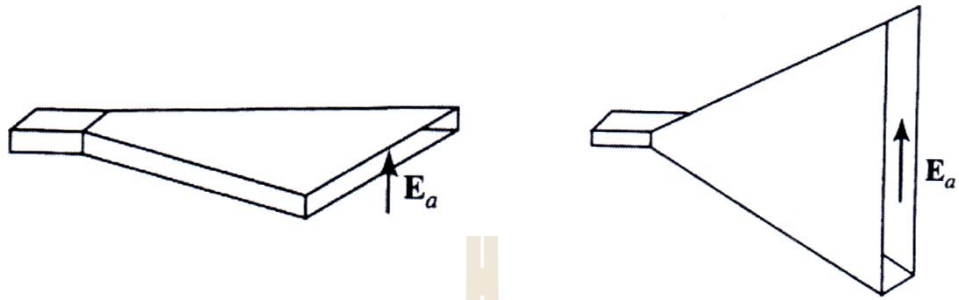
3.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องที่ใช้เป็นแนวทางและพื้นฐานในการวิเคราะห์และออกแบบพัฒนาสายอากาศปากแตรรูปรวย โดยจะประกอบด้วยเนื้อหาดังต่อไปนี้คือ ทฤษฎีและหลักการของสายอากาศปากแตรรูปรวยรวมถึงการออกแบบและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศปากแตรรูปรวย ทฤษฎีและคุณสมบัติของอภิวัด ทฤษฎีและหลักการของอภิวัด ชนิดสื่อตัวกลางแบบเส้นลวด วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวกลางแบบเส้นลวด ในส่วนสุดท้ายของบทนี้ก็จะกล่าวถึงบทสรุป

3.2 สายอากาศปากแตร (Horn Antennas)

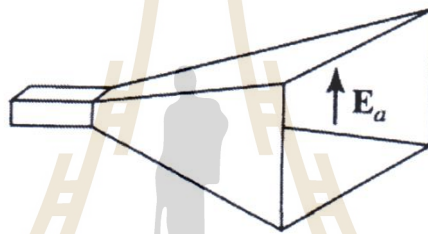
สายอากาศปากแตร (รังสรรค์ วงศ์สรรค, 2552) เป็นสายอากาศแบบอะเพอร์เจอร์ที่มีการปล่อยพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านออกมาจากอะเพอร์เจอร์หรือช่องเปิดของตัวสายอากาศ ซึ่งจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับการทำงานของเครื่องขยายเสียงที่เรียกว่าเมกะโฟน (megaphone) หรือ ไมโครโฟน (microphone) แบบที่มีตัวสะท้อนพาราโบลา ในกรณีที่ใช้สายอากาศปากแตรทำหน้าที่ในการรับสัญญาณก็จะใช้อะเพอร์เจอร์สำหรับรับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สายอากาศอะเพอร์เจอร์นิยมใช้กันในช่วงความถี่ตั้งแต่ UHF (Ultra-High Frequency) ขึ้นไป เนื่องจากสายอากาศแบบนี้จะให้อัตราขยายสูงและมีค่าเป็นสัดส่วนโดยประมาณกับความถี่กำลังสอง (f^2) และหากต้องการให้สายอากาศมีประสิทธิภาพและสภาพเจาะจงทิศทางของกำลังที่สูงขึ้น จะต้องออกแบบให้พื้นที่ของอะเพอร์เจอร์มีขนาดกว้างกว่าความยาวคลื่นใช้งานยกกำลังสอง (λ^2) ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งานกับย่านความถี่ต่ำเพราะจะทำให้สายอากาศมีขนาดใหญ่เกินไป ข้อดีของสายอากาศอะเพอร์เจอร์นอกจากให้อัตราขยายที่สูงแล้วค่าของอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (input impedance) ของสายอากาศจะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของตัวป้อน (feeder) ซึ่งทำให้ง่ายในการแมตช์สายอากาศสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (rectangular horn antenna) นิยมใช้งานกับความถี่ย่านไมโครเวฟ เพราะมีคุณสมบัติที่เป็นจุดเด่น คือ มีอัตราขยายที่สูงและมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งต่ำ นอกจากนี้ยังให้ความกว้างแถบค่าน้อยกว่าและที่สำคัญ คือ สามารถออกแบบและสร้างได้โดยง่าย สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากถูกแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบหลัก ได้แก่ (1) ปากแตรแบบเซกเตอร์ระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane sectoral horn) (2) ปากแตรแบบเซกเตอร์ระนาบ

สนามไฟฟ้า (E-plane sectoral horn) และ (3) ปากแตรทรงพีระมิด แสดงดังรูปที่ 3.1(ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ



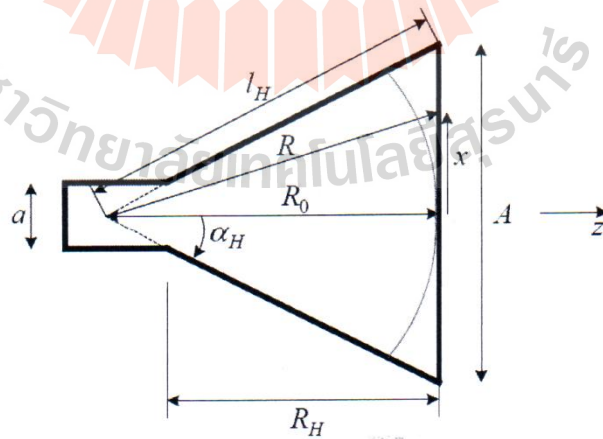
ก. ปากแตรแบบเซกเตอร์ระนาบสนามแม่เหล็ก

ข. ปากแตรแบบเซกเตอร์ระนาบสนามไฟฟ้า



ค. ปากแตรทรงพีระมิด

รูปที่ 3.1 ลักษณะของสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากทั้ง 3 แบบหลัก



รูปที่ 3.2 ภาพตัดขวางในระนาบสนามแม่เหล็กหรือระนาบ x-z ของปากแตรแบบเซกเตอร์

ในการออกแบบสายอากาศปากแตรให้มีความกว้างแถบมากขึ้นนั้น สามารถกระทำได้โดยการกาง (flaring) ส่วนของปากแตรให้มีลักษณะตามการเปลี่ยนแปลงของสนามเอกซ์โปเนนเชียลสำหรับสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากนี้ จะเหมาะสำหรับใช้กับสายส่งแบบท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (rectangular waveguide) เท่านั้น โดยส่วนที่เป็นปากแตรจะทำหน้าที่ในการส่งผ่านสัญญาณความถี่วิทยุย่านไมโครเวฟจากโหนดของท่อนำคลื่นออกไปสู่โหนดของอวกาศว่างในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แต่ถ้าสายส่งแบบท่อนำคลื่นเป็นแบบทรงกระบอก สายอากาศปากแตรที่ใช้งานกับท่อนำคลื่นแบบนี้ต้องเปลี่ยนเป็นสายอากาศปากแตรรูปกรวยแทน โดยขนาดสองมิติที่เป็นพื้นฐานสำหรับโครงสร้างของปากแตรแบบนี้ก็คือ A และ R_H

จากรูปที่ 3.2 เป็นการแสดงภาพตัดขวางของปากแตรแบบเซกเตอร์สนามแม่เหล็กซึ่งมีการกำหนดพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์ จากลักษณะของภาพตัดขวางเชิงเรขาคณิตของปากแตรซึ่งแสดงในรูปที่ 3.2 สามารถนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์สำคัญได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$l_H^2 = R_0^2 + \left(\frac{A}{2}\right)^2 \quad (3.1)$$

$$\alpha_H = \tan^{-1}\left(\frac{A}{2R_0}\right) \quad (3.2)$$

$$R_H = (A - a) \sqrt{\left(\frac{l_H}{A}\right) - \frac{1}{4}} \quad (3.3)$$

สำหรับองค์ประกอบของสนามในแนวสัมผัสทั้งที่เป็นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กซึ่งปรากฏที่ด้านเข้าของปากแตรจะเป็นองค์ประกอบของสนามที่ตัดขวางกันและอยู่ในโหมดเป็นใหญ่ (dominant mode) หรือโหมด TE_{10} ซึ่งเท่ากับ

$$E_y = E_0 \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) e^{-j\beta_g z} \quad (3.4ก)$$

$$H_x = -E_y / Z_g \quad (3.4ข)$$

โดยที่

$$Z_g = \frac{\eta}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \quad \text{คือ อิมพีแดนซ์ของคลื่นในโหมด TE}_{10}$$

$$\beta_g = \beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} \quad \text{คือ ค่าคงตัวการแพร่กระจายคลื่นในโหมด TE}_{10}$$

ในที่นี้ค่าคงตัวการแพร่กระจายคลื่น β_g จะเป็นค่าจินตภาพซึ่งให้ความหมายเฉพาะการเป็นค่าคงตัวเฟสที่เกิดขึ้นภายในท่อนำคลื่น โดย $\beta_0 = \omega\sqrt{\mu\epsilon} = 2\pi/\lambda$ สนามซึ่งแผ่ออกไปจากอะโพร์เจอร์ของปากแตรจึงเป็นสนามที่เดินทางออกมาจากท่อนำคลื่นนั่นเอง จะเห็นว่าอิมพีแดนซ์คลื่น (wave impedance) ของท่อนำคลื่นที่มีลักษณะค้อย ๆ ทางออกคล้ายปากแตรนั้น จะมีค่าเข้าสู่ค่าของอิมพีแดนซ์อินทรีนซิก (η) ของอวกาศว่างโดยสอดคล้องกับขนาดของ A (ความกว้างในระนาบสนามแม่เหล็ก) ที่มีขนาดมากขึ้น ความซับซ้อนยุ่งยากในการวิเคราะห์จะเกิดจากความจริงที่ว่าคลื่นซึ่งเดินทางมาถึงอะโพร์เจอร์ของปากแตรนี้มีเฟสที่แตกต่างกัน เนื่องจากเส้นทางจากจุดกึ่งกลางของท่อนำคลื่นมายังอะโพร์เจอร์ของปากแตรมีระยะที่แตกต่างกัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเฟสที่อะโพร์เจอร์ดังกล่าวจะกำหนดได้ด้วยสมการ (3.5)

$$e^{-j\beta(R-R_0)} \quad (3.5)$$

เนื่องจากอะโพร์เจอร์ไม่ได้ถูกวางออกในทิศทาง y ดังนั้นเฟสของคลื่นในทิศทางนี้จึงมีเฟสเท่ากันทำให้สามารถหาระยะของ R ได้จากสมการ (3.6)

$$R = \sqrt{R_0^2 + x^2} = R_0 \sqrt{1 + \left(\frac{x}{R_0}\right)^2} \approx R_0 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{x}{R_0}\right)^2 \right] \quad (3.6)$$

ดังนั้นหากระยะ $x \approx R_0$ หรือ $A/2 \approx R_0$ ก็จะสามารถประมาณได้ว่า

$$R - R_0 \approx \frac{1}{2} \frac{x^2}{R_0} \quad (3.7)$$

และเมื่อใช้ระยะโดยประมาณจากสมการ (3.7) จะสามารถหาผลเฉลยของสนามโดยประมาณที่อะโพร์เจอร์ของปากแตรได้เท่ากับ

$$E_{a_y} = E_0 \cos\left(\frac{\pi}{A}x\right) e^{-j\frac{\beta}{2R_0}x^2} \quad (3.8)$$

ต่อไปหากสมมติให้สนามที่ระนาบอะพอร์เจอร์ (ด้านนอกอะพอร์เจอร์) มีค่าศูนย์ สมการของสนามใน (3.8) เมื่อนำไปแทนในสมการ \mathfrak{I}_y^E จะได้

$$\mathfrak{I}_y^E = \iint_{S_A} E_{a_y}(x', y') e^{j\beta(x'\sin\theta\cos\varphi + y'\sin\theta\sin\varphi)} dx' dy' \quad (3.9)$$

หรือเท่ากับ

$$\mathfrak{I}_y^E = E_0 \int_{-A/2}^{+A/2} \cos\left(\frac{\pi}{A}x'\right) e^{-j\frac{\beta}{2R_0}x'^2} e^{j\beta\sin\theta\cos\varphi x'} dx' \times \int_{-b/2}^{+b/2} e^{j\beta\sin\theta\sin\varphi y'} dy' \quad (3.10)$$

เมื่อทำการอินทิกรัลจะได้ผลเฉลยของสมการ (3.10) ลดรูปลงเหลือเพียง

$$\mathfrak{I}_y^E = E_0 \left[\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi R_0}{\beta}} I(\theta, \varphi) \right] \left[\frac{\sin\left(\frac{\beta b}{2} \sin\theta \sin\varphi\right)}{\frac{\beta b}{2} \sin\theta \sin\varphi} \right] \quad (3.11)$$

โดยที่

$$I(\theta, \varphi) = e^{j\frac{R_0}{2\beta}\left(\beta\sin\theta\cos\varphi + \frac{\pi}{A}\right)^2} \left[C(s'_2) - jS(s'_2) - C(s'_1) + jS(s'_1) \right] + e^{j\frac{R_0}{2\beta}\left(\beta\sin\theta\cos\varphi - \frac{\pi}{A}\right)^2} \left[C(t'_2) - jS(t'_2) - C(t'_1) + jS(t'_1) \right] \quad (3.12)$$

และ

$$s'_1 = \sqrt{\frac{1}{\pi\beta R_0}} \left(-\frac{\beta A}{2} - R_0\beta u - \frac{\pi R_0}{A} \right), s'_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi\beta R_0}} \left(+\frac{\beta A}{2} - R_0\beta u - \frac{\pi R_0}{A} \right) \\ t'_1 = \sqrt{\frac{1}{\pi\beta R_0}} \left(-\frac{\beta A}{2} - R_0\beta u + \frac{\pi R_0}{A} \right), t'_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi\beta R_0}} \left(+\frac{\beta A}{2} - R_0\beta u + \frac{\pi R_0}{A} \right)$$

โดยที่

$$u = \sin\theta\cos\varphi$$

ขณะที่ $C(x)$ และ $S(x)$ คือ อินทิกรัลเฟรสเนล (Fresnel Integrals) ซึ่งได้กำหนดค่าไว้ดังต่อไปนี้

$$C(x) = \int_0^x \cos\left(\frac{\pi}{2}\tau^2\right) d\tau ; C(-x) = -C(x) \quad (3.13ก)$$

$$S(x) = \int_0^x \sin\left(\frac{\pi}{2} \tau^2\right) d\tau ; S(-x) = -S(x) \quad (3.13ข)$$

เพื่อให้ได้ผลเฉลยของ \mathfrak{F}_y^E มีความแม่นยำมากขึ้น การประมาณค่าโดยใช้สมการ (3.6) จะไม่สามารถนำมาใช้ได้ และ E_{a_y} เมื่อถูกแทนลงในสมการ (3.9) จะได้

$$\begin{aligned} E_{a_y} &= E_0 \cos\left(\frac{\pi}{A} x\right) e^{-j\beta(\sqrt{R_0^2+x^2}-R_0)} \\ &= E_0 e^{-j\beta R_0} \cos\left(\frac{\pi}{A} x\right) e^{-j\beta\sqrt{R_0^2+x^2}} \end{aligned} \quad (3.14)$$

เมื่อนำมาคำนวณหาองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าที่เป็นสนามไกลจะได้

$$E_\theta = \left[j\beta \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} (1 + \cos\theta) \sin\varphi \right] \times \mathfrak{F}_y^E \quad (3.15ก)$$

$$E_\varphi = \left[j\beta \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} (1 + \cos\theta) \cos\varphi \right] \times \mathfrak{F}_y^E \quad (3.15ข)$$

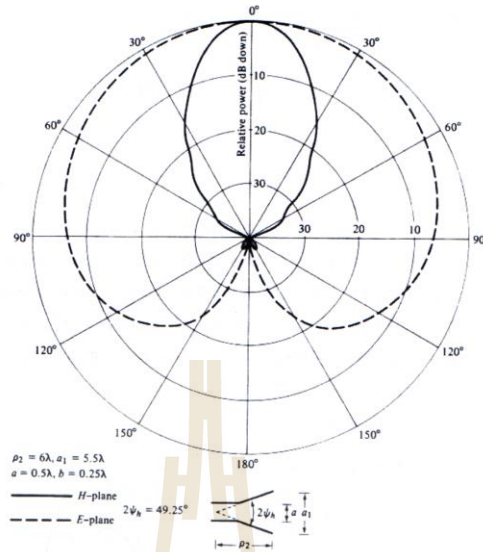
หรือเขียนในรูปของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าก็จะได้

$$\vec{E} = j\beta E_0 \sqrt{\frac{\pi R_0}{\beta}} \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \left(\frac{1 + \cos\theta}{2} \right) \begin{bmatrix} \sin\left(\frac{\beta b}{2} \sin\theta \sin\varphi\right) \\ \frac{\beta b}{2} \sin\theta \sin\varphi \end{bmatrix} I(\theta, \varphi) (\theta \sin\varphi + \varphi \cos\varphi) \quad (3.16)$$

เมื่อต้องการทราบแบบรูปแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายอากาศปากแตรแบบเซกเตอร์ ระนาบสนามแม่เหล็ก จะสามารถหาได้จาก

$$|\vec{E}| = \left(\frac{1 + \cos\theta}{2} \right) \begin{bmatrix} \sin\left(\frac{\beta b}{2} \sin\theta \sin\varphi\right) \\ \frac{\beta b}{2} \sin\theta \sin\varphi \end{bmatrix} I(\theta, \varphi) \quad (3.17)$$

3.2.1 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบหลัก



รูปที่ 3.3 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรแบบเซกเตอร์ระนาบสนามแม่เหล็ก (ภาพจาก Balanis : Antenna Theory)

สำหรับแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบหลักนั้น จะแสดงเฉพาะในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 3.3 ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปของสมการต่อไปนี้

ระนาบสนามไฟฟ้า ($\varphi = 90^\circ$)

$$F_E(\theta) = \left(\frac{1 + \cos\theta}{2} \right) \left[\frac{\sin\left(\frac{\beta b}{2} \sin\theta \sin\varphi\right)}{\frac{\beta b}{2} \sin\theta \sin\varphi} \right] \quad (3.18)$$

ระนาบสนามแม่เหล็ก ($\varphi = 0^\circ$)

$$F_H(\theta) = \frac{1 + \cos\theta}{2} \times f_H(\theta) = \frac{1 + \cos\theta}{2} \times \frac{I(\theta, \varphi = 0^\circ)}{I(\theta = 0^\circ, \varphi = 0^\circ)} \quad (3.19)$$

เทอมอินทิกรัลของ $I(\theta, \varphi)$ ที่อยู่ในสมการ (3.19) นี้ จะเป็นเทอมที่ได้จากการประมาณซึ่งเป็นผลที่ต่อเนื่องจากการประมาณค่าเฟสจากสมการ (3.7) โดยค่าที่แม่นยำของเทอม

$f_H(\theta)$ ในสมการเดียวกันนี้ จะสามารถหาได้โดยการอินทิเกรตเชิงตัวเลขของสนามที่กำหนดให้ในสมการ (3.13) นั่นคือ

$$f_H(\theta) \propto \int_{-A/2}^{+A/2} \cos\left(\frac{\pi x'}{A}\right) e^{j\beta\sqrt{R_0^2+x'^2}} e^{j(\beta\sin\theta)x'} dx' \quad (3.20)$$

3.2.2 สภาพเงาจกทิศทาง

การหาผลเฉลยของสภาพเงาจกทิศทางของสายอากาศปากแตรแบบเซกเตอร์รีระนาบสนามแม่เหล็กสามารถกระทำได้ โดยใช้สมการทั่วไปซึ่งใช้สำหรับสายอากาศแบบอะเพอร์เจอร์นั้นคือ

$$D_0 = \frac{4\pi}{\lambda^2} \frac{\left| \int_{S_A} \vec{E}_a ds' \right|^2}{\iint_{S_A} |\vec{E}_a|^2 ds'} \quad (3.12)$$

จากสมการ (3.12) เทอมอินทิกรัลที่เป็นตัวหารจะมีค่าเป็นสัดส่วนกับกำลังรวมที่แผ่ออกไป ซึ่งแสดงได้ด้วยสมการ (3.22)

$$2\eta\Pi_{rad} = \iint_{S_A} |\vec{E}_a|^2 ds' = \int_{-b/2-A/2}^{+b/2+A/2} \int |\vec{E}_0|^2 \cos^2\left(\frac{\pi}{A}x'\right) dx' dy' = |\vec{E}_0|^2 \frac{Ab}{2} \quad (3.22)$$

สำหรับผลเฉลยในส่วนที่เป็นตัวตั้งของสมการ (3.21) นั้น สนามจะถูกแทนด้วยเฟสที่ได้จากการประมาณค่าในสมการ (3.8) สุดท้ายจึงได้ผลเฉลยของสภาพเงาจกทิศทางของสายอากาศแบบนี้ในรูปของสมการ

$$D_H = \frac{b}{\lambda} \frac{32}{\pi} \left(\frac{A}{\lambda}\right) \varepsilon_{ph}^H = \frac{4A}{\lambda^2} \varepsilon_t \varepsilon_{ph}^H (Ab) \quad (3.23)$$

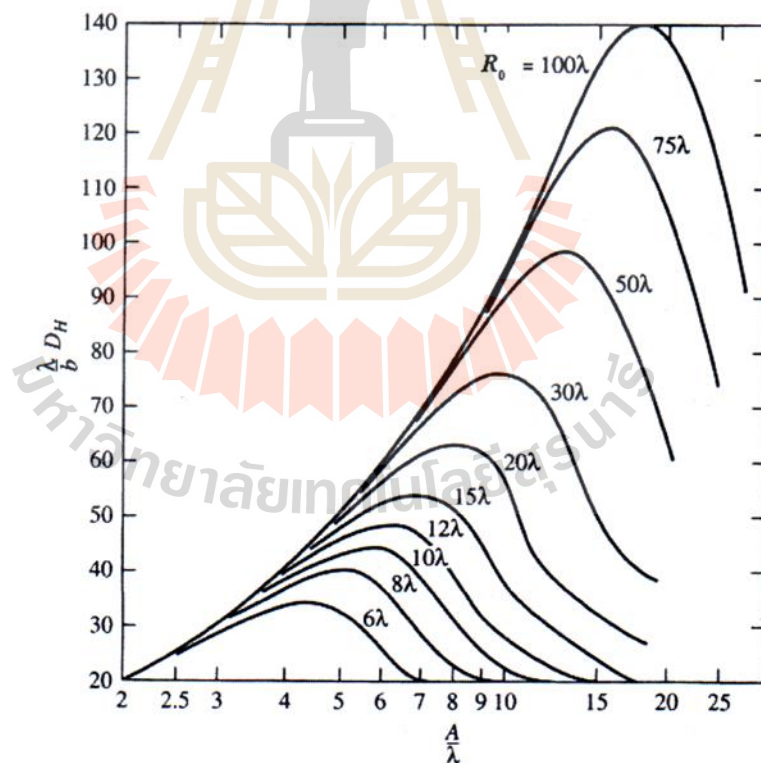
โดยที่

$$\varepsilon_t = \frac{8}{\pi^2}, t = \frac{1}{8} \left(\frac{A}{\lambda}\right)^2 \frac{1}{R_0/\lambda}$$

$$\varepsilon_{ph}^H = \frac{\pi^2}{64t} \left\{ [C(p_1) - C(p_2)]^2 + [S(p_1) - S(p_2)]^2 \right\}$$

$$p_1 = 2\sqrt{t} \left[1 + \frac{1}{8t} \right], \quad p_2 = 2\sqrt{t} \left[-1 + \frac{1}{8t} \right]$$

จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพอะเพอร์เจอร์ ของสายอากาศ ซึ่งแสดงด้วยเทอมของ ε , นั้นจะเกิดจากการเรียวของอะเพอร์เจอร์ ส่วนประสิทธิภาพอะเพอร์เจอร์ซึ่งแสดงด้วยเทอม ε_{ph}^H จะเกิดจากการแ่งรูปของเฟสซึ่งเกิดขึ้นที่อะเพอร์เจอร์ และเมื่อนำค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศปากแตรแบบเซกเตอร์ รัศมีขนาดแม่เหล็กมาพล็อตเป็นกราฟ โดยกำหนดให้ระยะตามแนวแกน R_0 มีขนาดที่แตกต่างกัน ก็จะได้ผลลัพธ์ในรูปของกราฟดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าระยะดังกล่าวนี้จะเป็นตัวกำหนดขนาดความกว้าง A ของอะเพอร์เจอร์ และหากอะเพอร์เจอร์มีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้สภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศมีค่าสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศปากแตรแบบเซกเตอร์ ในรัศมีขนาดแม่เหล็กซึ่งมีระยะของ R_0 แตกต่างกัน (จากภาพ Balanis : Antenna Theory)

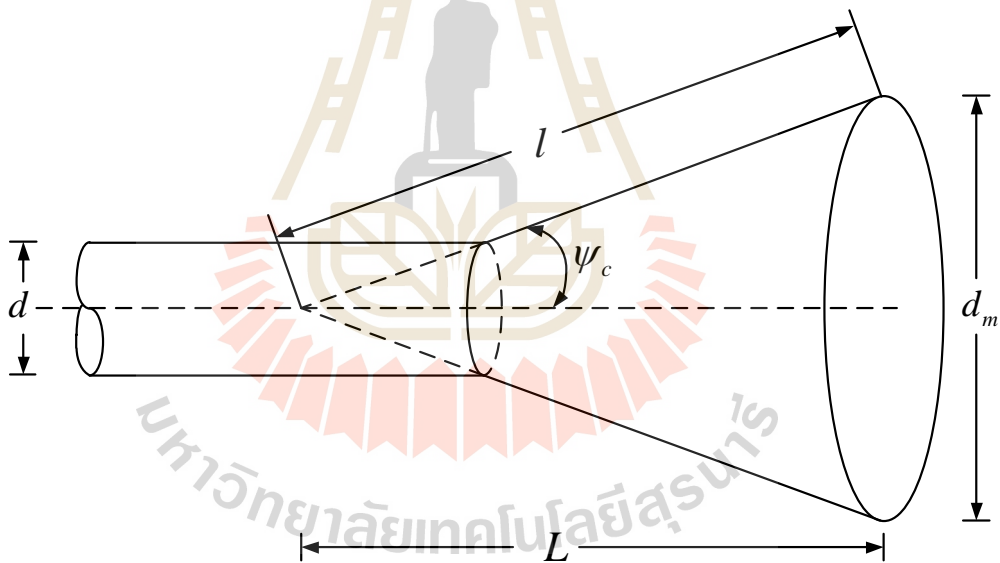
จากรูปที่ 3.4 สังเกตว่าการที่สภาพเงาเชิงทิศทางมีค่าสูงสุดนั้น ตัวแปรหลักที่สำคัญ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของปากแตร (A) และระยะห่างจากจุดกึ่งกลางของท่อนำคลื่นไปถึงปลายอะเพอร์เจอร์ของปากแตร (R_0) ซึ่งแสดงไว้ด้วยสมการ

$$A = \sqrt{3\lambda R_0} \quad (3.24)$$

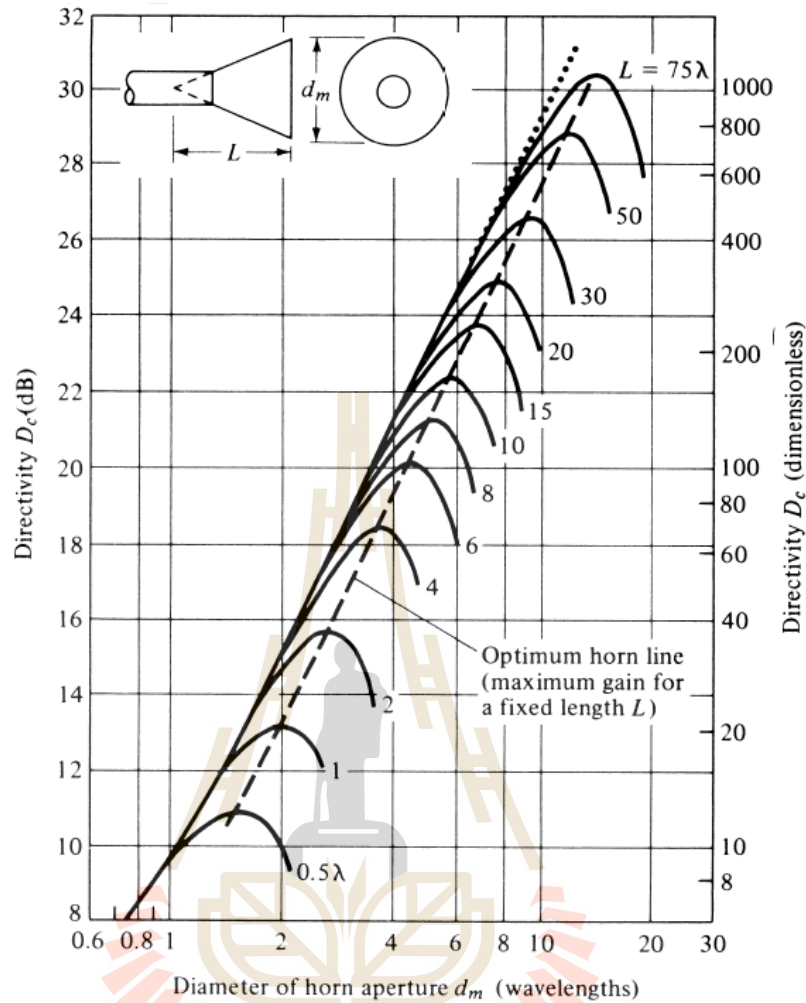
หรือ

$$\frac{A}{\lambda} = \sqrt{3 \frac{R_0}{\lambda}} \quad (3.25)$$

3.3 สายอากาศปากแตรรูปกรวย (Conical Horn Antenna)



รูปที่ 3.5 ลักษณะของสายอากาศปากแตรรูปกรวย



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงการคำนวณอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของปากอะเพอร์เจอร์และความยาวของสายอากาศปากแตรรูปกรวย

(King, 1950)

สายอากาศปากแตรรูปกรวย (Conical Horn Antenna) เป็นสายอากาศปากแตรอีกชนิดหนึ่งที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในงานอย่างมากในย่านความถี่ไมโครเวฟ สายอากาศปากแตรรูปกรวยมีจุดเด่นคล้ายกันกับสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Rectangular Horn Antenna) โดยปกติสายอากาศปากแตรรูปกรวยนิยมกระตุ้นโดยท่อนำคลื่นทรงกระบอก (Cylindrical Waveguide) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งจะทำงานในโหมด TE_{11} และนอกจากนี้ยังสามารถต่อร่วมกับท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Rectangular Waveguide) ซึ่งจะทำงานในโหมด TE_{10} ซึ่งการต่อร่วมกับท่อนำคลื่นทั้งสองแบบนี้จะให้ประสิทธิภาพที่เหมือนกัน โหมดการทำงานของสายอากาศปากแตรสามารถแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนในการรวมกันระหว่างฟังก์ชันแฮนเกลทรงกลม (spherical Hankel) และฟังก์ชันเลอจองด์ร์ (Legendre function) ในการประยุกต์ใช้งานของ

ทฤษฎีการเลี้ยวเบนของเวกเตอร์ (Vector diffraction Theory) ซึ่งความเป็นไปได้แต่จะมีความยุ่งยากซับซ้อนในการแก้ปัญหาหากพิจารณาในรูปแบบของสนามจะเป็นวิธีที่ง่ายและไม่ซับซ้อน

ในการออกแบบสายอากาศปากแตรรูปกรวยเป็นที่ทราบกันดีว่าอัตราขยายของสายอากาศปากแตรจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดของแกนความยาวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตร ซึ่งอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยสามารถแสดงด้วยเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกนความยาวกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยดังแสดงในรูปที่ 3.5 จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มขนาดของสายอากาศจะมีค่าพารามิเตอร์ที่จะทำให้สายอากาศปากแตรรูปกรวยให้อัตราขยายสูงที่สุดและเมื่อทำการเพิ่มขนาดความยาวของสายอากาศที่ยาวเกินไปจะทำให้อัตราขยายของสายอากาศลดลง

สำหรับสายอากาศปากแตรรูปกรวยนั้นเป็นที่ทราบกันดีว่าไม่สามารถควบคุมความกว้างแถบความถี่ในระนาบหลักได้อย่างอิสระ ท่อนำคลื่นทรงกลมสามารถรองรับในแนวแกนสนามไฟฟ้าใดๆได้ขึ้นอยู่กับความต้องการโพลาริเซชันภายในสายอากาศปากแตร ในการวิเคราะห์ขนาดอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยนั้นจะใช้วิธีการที่คล้ายกับสายอากาศปากแตรสี่เหลี่ยมมุมฉาก คือกรวยของสายอากาศปากแตรไปยังจุดป้อนของท่อนำคลื่นเฟสที่อะเพอร์เจอร์มีค่าประมาณสมการกำลังสอง โดยสมการสนามของท่อนำคลื่นคือ

$$E_\rho = \frac{E_0}{\rho} J_1' \left(\frac{\chi_{11}' \rho}{a} \right) \cos \phi_c \quad (3.26ก)$$

$$E_{\phi_c} = -\frac{E_0 \chi_{11}'}{a} J_1' \left(\frac{\chi_{11}' \rho}{a} \right) \sin \phi_c \quad (3.26ข)$$

โดยที่ J_1' คือฟังก์ชันเบสเซล (Bessel function)
 ρ คือองค์ประกอบการแพร่กระจายในท่อนำคลื่น
 a คือรัศมีท่อนำคลื่น
 ϕ_c คือพิกัดทรงกระบอก

จากสมการ (3.26) มีสนามไฟฟ้าสูงสุดในทิศทางตามระนาบ $\phi_c = 0$ เมื่อเพิ่มตัวประกอบกำลังสองของเฟสในสมการ (3.26) และคำนวณฟูรีเยร์ทรานฟอร์มในอะเพอร์เจอร์ทรงกลมเพื่อตรวจสอบสนามระยะไกล ทิศทางของสนามไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปจากจุดต่อจุดภายในอะเพอร์เจอร์

สำหรับการกำหนดทิศทาง (θ, ϕ_c) จะแสดงสนามที่เกิดขึ้นภายในอะโพร์เจอร์บนทิศทาง θ และ ϕ_c ก่อนที่จะมารวมกันทั้งหมดที่อะโพร์เจอร์ตั้งสมการ (3.27) และสมการ (3.28)

$$E_\theta = E_0 \int_0^{2\pi} \int_0^a \left[\frac{J_1(\chi'_{11} \rho/a)}{\rho} \cos \phi_c \frac{\hat{\theta} \cdot \hat{\rho}}{\cos \theta} - \frac{\chi'_{11}}{a} J_1\left(\frac{\chi'_{11} \rho}{a}\right) \sin \phi_c \frac{\hat{\theta} \cdot \hat{\phi}_c}{\cos \theta} \right] \times \rho \exp \left\{ j \left[k_\rho \sin \theta \cos(\phi - \phi_c) - 2\pi S \left(\frac{\rho}{a} \right)^2 \right] \right\} d\rho d\phi_c \quad (3.27)$$

$$E_\phi = E_0 \int_0^{2\pi} \int_0^a \left[\frac{J_1(\chi'_{11} \rho/a)}{\rho} \cos \phi_c \frac{\hat{\theta} \cdot \hat{\rho}}{\cos \theta} - \frac{\chi'_{11}}{a} J_1\left(\frac{\chi'_{11} \rho}{a}\right) \sin \phi_c \frac{\hat{\theta} \cdot \hat{\phi}_c}{\cos \theta} \right] \times \rho \exp \left\{ j \left[k_\rho \sin \theta \cos(\phi - \phi_c) - 2\pi S \left(\frac{\rho}{a} \right)^2 \right] \right\} d\rho d\phi_c \quad (3.28)$$

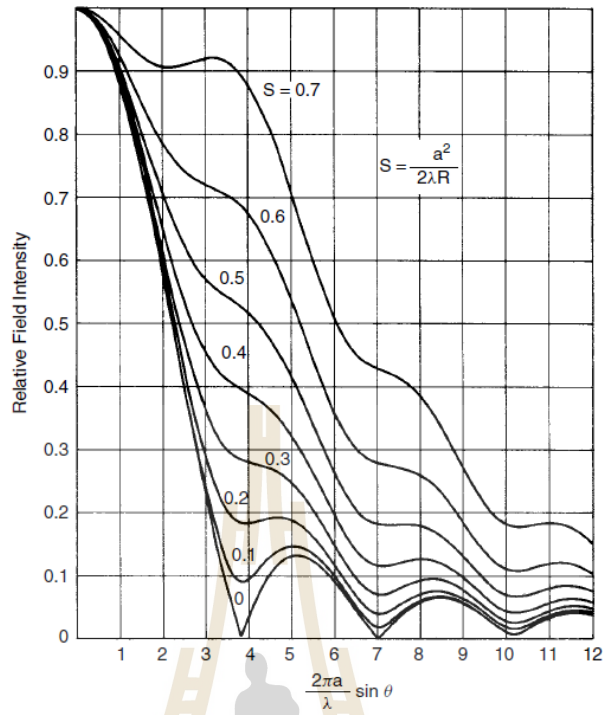
$$\hat{\theta} \cdot \hat{\rho} = \cos \theta (\cos \phi \cos \phi_c + \sin \phi \sin \phi_c)$$

$$\hat{\theta} \cdot \hat{\phi}_c = \cos \theta (\sin \phi \cos \phi_c - \cos \phi \sin \phi_c)$$

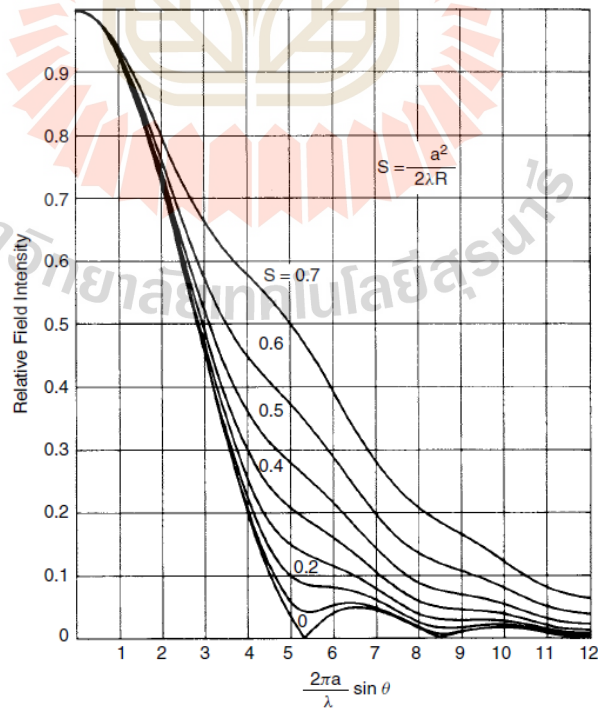
$$\hat{\phi} \cdot \hat{\rho} = \cos \phi \sin \phi_c - \sin \phi \cos \phi_c$$

$$\hat{\phi} \cdot \hat{\phi}_c = \cos \phi \cos \phi_c + \sin \phi \sin \phi_c$$

จากการเปลี่ยนค่าตัวแปรที่เหมาะสมในปริพันธ์แบบรูปการแผ่กำลังมาตรฐานสามารถสร้างระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 3.7 และ 3.8 จาก S ที่เท่ากันในระนาบทั้งสองมีความสัมพันธ์กันระหว่างเส้นกราฟร่วมกัน เราจึงสามารถคำนวณแบบรูปการแผ่พลังงานเพียงไม่กี่จุดสำหรับกราฟเส้นโค้งที่ได้



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า
(ภาพจาก Thomas: Modern Antenna Design)



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก
(ภาพจาก Thomas: Modern Antenna Design)

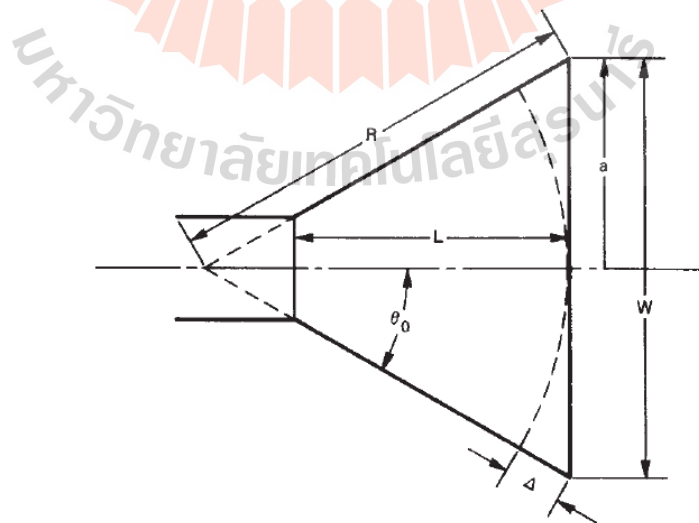
3.3.1 จุดศูนย์กลางเฟส (Phase Center)

การให้นิยามของจุดศูนย์กลางเฟส (phase center) คือจุดที่สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นทรงกลม (spherical wave) โดยในการวัดจะเห็นได้ว่าจุดศูนย์กลางเฟสนั้นมักจะเป็นจุดที่เป็นจุดเฉพาะในแต่ละระนาบ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจุดศูนย์กลางเฟสในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก โดยปกติแล้วจุดศูนย์กลางเฟสในการแพร่กระจายมักจะอยู่หลังอะพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตรหรือภายในสายอากาศปากแตร ในกรณีที่ไม่มี การผิดพลาดของเฟสการแพร่กระจาย ($S = 0$) จุดศูนย์กลางเฟสจะอยู่ที่แนวระนาบปากอะพอร์เจอร์

Muehldorf ได้อธิบายจุดศูนย์กลางเฟสภายในสายอากาศปากแตรรูปกรวยแสดงในรูปแบบฟังก์ชันของสมการกำลังสองเฟสการแพร่กระจาย (quadratic phase destitution) หรือฟังก์ชัน S ซึ่งแสดงการหาค่าฟังก์ชัน S ดังสมการ (3.29) และ (3.30) โดยสรุปค่าฟังก์ชัน S ดังตารางที่ 3.1 ซึ่งแสดงค่าจุดศูนย์กลางเฟสตามอัตราส่วนของรัศมีมุมเอียงของกรวย ซึ่งเมื่อค่า S มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจุดศูนย์กลางเฟสก็จะเลื่อนออกไปทิศทางปากอะพอร์เจอร์และความแตกต่างจุดศูนย์กลางเฟสระหว่างในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กก็จะเพิ่มขึ้นตาม

$$S = \frac{\Delta}{\lambda} = \frac{W^2}{8\lambda R} \quad (3.29)$$

$$S = \frac{\Delta}{\lambda} = \frac{a^2}{2\lambda R} \quad (3.30)$$



รูปที่ 3.9 โครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยแนวตัดขวาง
(ภาพจาก Thomas: Modern Antenna Design)

ตาราง 3.1 จุดศูนย์กลางเฟสของสายอากาศปากแตรรูปกรวยภายใต้โหมด TE_{11} สำหรับอัตราส่วนรัศมีมุมเอียงของปากแตร

S	H-Plane L_{ph}/R_h	E-Plane L_{ph}/R_e	S	H-Plane L_{ph}/R_h	E-Plane L_{ph}/R_e
0.00	0.0	0.0	0.28	0.235	0.603
0.04	0.0046	0.012	0.32	0.310	0.782
0.08	0.018	0.048	0.36	0.397	0.801
0.12	0.042	0.109	0.40	0.496	0.809
0.16	0.075	0.194	0.44	0.604	0.832
0.20	0.117	0.305	0.48	0.715	0.872
0.24	0.171	0.416			

3.4 อภิวัด (Metamaterial)

อภิวัดหรือวัสดุเมธาเริ่มได้รับความสนใจจากนักวิจัยและนักวิทยาศาสตร์เป็นอย่างมากในช่วงหลายปีที่ผ่านมา จากคุณสมบัติของอภิวัดคือ วัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษที่ไม่ปรากฏตามธรรมชาติ โดยได้ถูกนิยามไว้ว่าเป็นวัสดุเชิงวิศวกรรมที่มีคุณสมบัติที่ไม่ปรากฏตามธรรมชาติ โดยการเกิดคุณสมบัติดังกล่าวนั้นเกิดจากโครงสร้างมากกว่าการจัดเรียง จากการผนวกรวมกันของวัสดุขนาดเล็กซึ่งตามปกติวัสดุที่ถูกจัดเรียงเพื่อทำการผนวกรวมกันนั้นจะมีขนาดที่เล็กกว่าความยาวคลื่นมากๆ ที่มีคุณสมบัติไม่เหมือนกันเพื่อทำให้เกิดคุณสมบัติประสิทธิผลในระดับมาโคร โดยคุณสมบัติอภิวัดนั้นถูกนำมาใช้ในการชดเชยข้อจำกัดของวัสดุตามธรรมชาติ นักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยจึงให้ความสนใจนำคุณสมบัติดังกล่าวมาทำการออกแบบวิจัยพัฒนาสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมใหม่ๆ ขึ้นตามมา (ศราวุธและประยุทธ, 2011) ซึ่งโดยทั่วไปนั้นอภิวัดจะถูกกำหนดคุณสมบัติจากโครงสร้างที่ได้จากการออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อให้เกิดคุณสมบัติตามที่ต้องการ โดยคุณสมบัติดังกล่าวนี้จะไม่อยู่ในวัสดุที่มีอยู่ในธรรมชาติ หากทำการพิจารณาอภิวัดในระดับไมโครจะเห็นความไม่สม่ำเสมอของวัสดุอยู่ ซึ่งจากคุณสมบัติดังกล่าวนี้มันจะถูกแสดงด้วยคุณสมบัติประสิทธิผลของการตอบสนองในระดับมหภาค (effective macroscopic behavior)

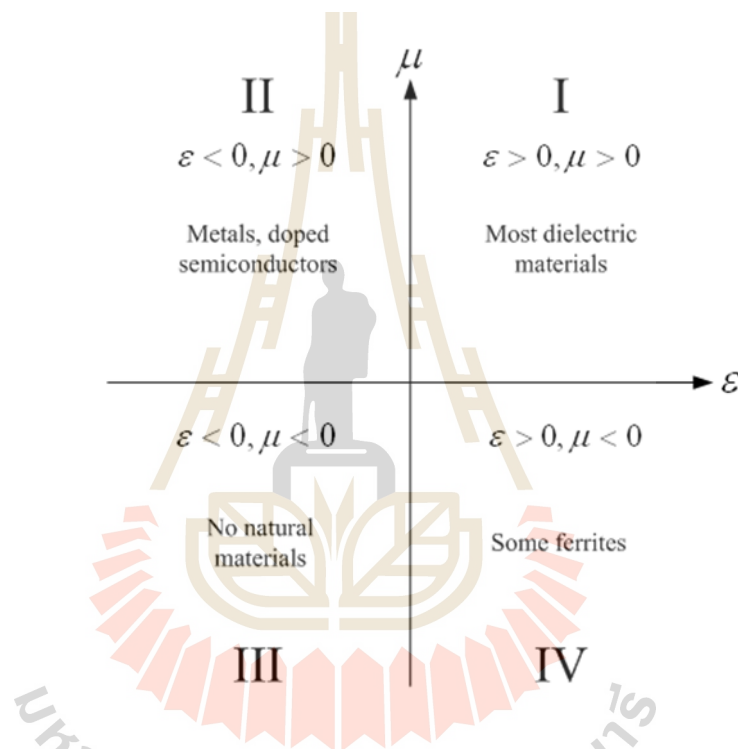
ในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับอภิวัดในยุคแรกๆ เริ่มต้นจากการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่มีดัชนีการหักเหเป็นลบ (negative reflection index) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการเพิ่มความละเอียดของรูปภาพซึ่งถูกนำมาออกแบบและสร้างซูเปอร์เลนส์ (super lens) ซึ่งจากการนำคุณสมบัติดังกล่าวพบว่าสามารถทำการขยายภาพโดยภาพที่ได้มีความละเอียดสูงขึ้นจากการที่ใช้เลนส์ปกติทั่วไป ต่อจากนั้นไม่นานได้มีการนำคุณสมบัติของอภิวัดมาออกแบบและพัฒนาสำหรับใช้งานเกี่ยวกับคลื่น

แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) อีกทั้งยังมีการนำไปพัฒนาวิจัยเกี่ยวกับทางด้านคลื่นเสียง (acoustic) และงานทางด้านคลื่นปฐพี (seismic) อีกด้วย อภิวัดคุณนั้นถือได้ว่าเป็นเป็นเทคโนโลยีที่สามารถนำไปวิจัยพัฒนาและประยุกต์ใช้กับงานหลายด้าน เช่น งานทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมไมโครเวฟ วิศวกรรมสายอากาศ วิศวกรรมสารกึ่งตัวนำ วิศวกรรมออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ของแข็ง วัสดุศาสตร์ วิทยาศาสตร์นาโน และอื่นๆ อีกมากมาย

เป็นที่ทราบกันดีว่าตัวกลางที่มีผลต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดจากการผนวกตัวของ การเหนี่ยวนำของโมเมนต์ทางไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก (electric and magnetic moment) ซึ่ง ผลกระทบระดับมาโครจะอยู่ในรูปของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (effective permittivity : ϵ) และความซึมซาบแม่เหล็กประสิทธิผล (permeability : μ) ของตัวกลางขนาดใหญ่ (bulk medium) ดังนั้นอภิวัดคุณก็อาจจะเกิดจากการประกอบรวมกันของวัสดุประติษฐ์หลายชนิดฝังตัวเข้าไปยังในตัวกลางหรือผิวของตัวกลางที่ผู้ออกแบบเป็นผู้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้อย่างอิสระ เช่น คุณสมบัติต่างๆ ของตัวกลาง รูปร่าง ขนาด การจัดวางตำแหน่ง และอื่นๆ เพื่อให้ได้ผลได้ผลตอบสนองพิเศษทางแม่เหล็กไฟฟ้า

เริ่มแรกในการวิจัยเกี่ยวกับอภิวัดคุณผู้วิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นความสนใจไปยังวัสดุที่มีดัชนีหักเหเป็นลบซึ่งจะทำให้เกิดค่าค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า และค่าความซึมซาบแม่เหล็กเป็นลบทั้งคู่ ($\epsilon < 0$ และ $\mu < 0$) ซึ่งวัสดุชนิดนี้จะเรียกว่า Double Negative Medium (DNG) เนื่องจากวัสดุ DNG มีคุณสมบัติตรงข้ามกับวัสดุส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในธรรมชาติคือ มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็กเป็นบวกทั้งคู่ ($\epsilon > 0$ และ $\mu > 0$) หรือเรียกว่า Double Positive Medium (DPS) ในปี ค.ศ. 1968 แนวคิดเกี่ยวกับวัสดุเชิงซ้อนที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็กเป็นลบทั้งคู่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดย Veselgo ได้ตั้งสมมติฐานและหาคำตอบเชิงทฤษฎีว่า เมื่อคลื่นระนาบเดินทางเข้าไปยังตัวกลางที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็กเป็นลบทั้งคู่จะเกิดผลอย่างไร จากผลการศึกษาเขาพบว่าทิศทางของพอยน์ติงเวกเตอร์ (pointing vector) จะขนานกับทิศทางของความเร็วเฟส (phase velocity) แต่มีทิศทางตรงกันข้ามกัน (anti-parallel) ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาในกรณีที่คลื่นเคลื่อนที่ในตัวกลาง DPS เมื่อพิจารณาคลื่นระนาบเดียวกันพบว่า ทิศทางของพอยน์ติงเวกเตอร์ที่เกิดขึ้นจะขนานกันและมีทิศทางเดียวกันกับความเร็วเฟส ในกรณีที่อภิวัดคุณที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็กเป็นลบทั้งคู่ นั้นได้มีการเรียกชื่อหลายชื่อ เช่น DNG มาจากค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าซึมซาบเป็นลบทั้งคู่ อีกชื่อหนึ่งคือ Negative Refractive Index (NRI) มาจากคุณสมบัติของวัสดุที่มีมุมหักเหเป็นลบ (left handed medium: LHM) ซึ่งโดยปกติทั่วไปของวัสดุจะพิจารณาโดยใช้กฎมือขวาของปริมาณเวกเตอร์สามตัวคือ สนามไฟฟ้า (E) สนามแม่เหล็ก (H) และทิศทางการเคลื่อนที่ (k) แต่ในทางตรงกันข้ามอภิวัดคุณจะมีการพิจารณาปริมาณเวกเตอร์โดยใช้กฎมือซ้าย (backward wave: BW) ซึ่งมาจากนิยามของ

Veselgo เพราะทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นนั้นเกิดขึ้นตรงกันข้ามกับทิศทางของพอยน์ติงเวกเตอร์ และ Negative Phase Velocity (NPV) เกิดขึ้นจากคุณสมบัติของคลื่นเมื่อเดินทางผ่านอวิวัสดุแล้ว จะทำให้เวกเตอร์เฟสที่เกิดขึ้นมีค่าเป็นลบ นอกจากนี้ในช่วงความถี่ใดๆ เมื่อคลื่นเดินทางผ่านวัสดุ บางชนิดอาจทำให้คุณสมบัติของวัสดุมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าหรือค่าซึมซาบแม่เหล็กมีค่าเป็นลบ ซึ่งในกรณีดังกล่าวนี้จะเรียกว่า single negative medium (SNG) โดยถ้าในกรณีที่วัสดุมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเป็นลบเพียงอย่างเดียวจะเรียกว่า epsilon negative medium (ENG) และในกรณีที่ค่าซึมซาบแม่เหล็กเป็นลบอย่างเดียวเรียกว่า mu negative medium (MNG)



รูปที่ 3.10 แผนผังสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็ก

นอกจากนี้คุณสมบัติของอวิวัสดุที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากอีกประเภทหนึ่งคือ กรณีที่อวิวัสดุนั้นมีค่าดัชนีหักเหมีค่าเท่ากับศูนย์ (zero refractive index: ZRI) หรือมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ (near zero refractive index: NZI) โดยจากคุณสมบัติดังกล่าวนี้สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งหมด 3 กรณี ดังนี้

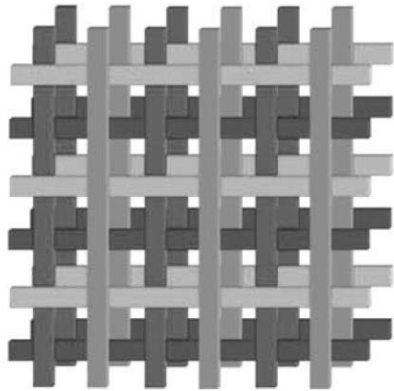
1. Epsilon Near Zero (ENZ) คือ วัสดุที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ ($\epsilon = 0$) หรือมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ($\epsilon \rightarrow 0$) และค่าซึมซาบแม่เหล็กมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับหนึ่ง ($\mu \geq 1$)
2. Mu Near Zero (MNZ) คือ วัสดุที่มีค่าซึมซาบแม่เหล็กเท่ากับศูนย์ ($\mu = 0$) หรือมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ($\mu \rightarrow 0$) และมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้ามากกว่าหรือเท่ากับหนึ่ง ($\epsilon \geq 1$)

3. Mu-Epsilon Near Zero (MENZ) คือ วัสดุที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าซึมซาบแม่เหล็กมีค่าเท่ากับศูนย์ ($\epsilon = \mu = 0$) หรือวัสดุที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าซึมซาบแม่เหล็กมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ($\epsilon \rightarrow \mu \rightarrow 0$)

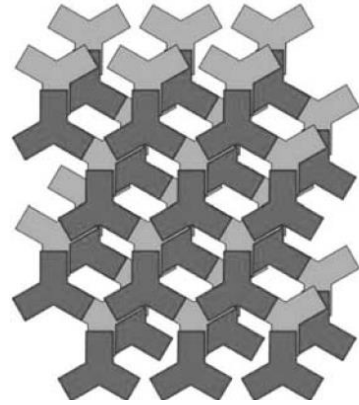
จากทั้งสามกรณีที่เกิดขึ้นนั้นจะมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับศูนย์ ($n = 0$) หรือดัชนีหักเหเข้าใกล้ศูนย์ ($n \rightarrow 0$) เมื่อทำการพิจารณาในคุณสมบัติอื่นๆจะพบว่ามีความแตกต่างกัน (ศราวุธและประยูทธ, 2011) ดังนั้นสามารถแสดงคุณสมบัติของอภิวัดในกรณีต่างๆด้วยค่าพารามิเตอร์ของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (ϵ และ μ) พารามิเตอร์ทั้งสองนี้สามารถนำมาแบ่งกลุ่มของวัสดุได้แสดงดังรูปที่ 3.10

3.5 โพรงช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบดอกเห็ด

โพรงช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบดอกเห็ด (Mushroom-like Electromagnetic Band Gap) หรือ EBG คือวัสดุที่ขัดขวางหรือสนับสนุนการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแถบความถี่ที่เฉพาะเจาะจงสำหรับทุก ๆ มุมตกกระทบและทุก ๆ สถานะของการโพลาไรซ์ โดยปกติแล้ว EBG จะประกอบด้วยวัตถุที่เป็นไดอิเล็กตริกและตัวนำที่เป็นโลหะ โดยสามารถแบ่งประเภทของ EBG ตามลักษณะโครงสร้างของ EBG ได้ 3 ประเภท ได้แก่ (1) EBG โครงสร้างปริมาตรแบบ 3 มิติ (2) EBG ระนาบบนผิวหน้าแบบ 2 มิติ และ (3) EBG เส้นส่งผ่านพลังงานแบบ 1 มิติ รูปที่ 3.11 แสดงโพรงของ EBG แบบ 3 มิติ คือ มีโพรงเป็นลักษณะแบบกองฟืน (woodpile) ซึ่งประกอบด้วยแถบสี่เหลี่ยมของไดอิเล็กตริก (E. Ozbay, A. Abeyta, G. Tuttle, M. Tringides, R. Biswas, C. T. Chan, C. M. Soukoulis, and K. M. Ho, 1994) และมีโพรงเป็นแถวลำดับแบบมีขา (tripod array) ซึ่งจะเป็นโลหะหลาย ๆ ชั้นซ้อนกันอยู่ (A.S. Barlevy, and Y. Rahmat-Samii, 2001) แสดงดังรูปที่ 3.12 (ก) และ (ข) ตามลำดับ สำหรับ EBG ระนาบบนผิวหน้าแบบ 2 มิติ จะมีลักษณะเป็นผิวหน้าแบบดอกเห็ด (mushroom-like) (D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. J. Broas, N. G. Alexopolous, and E. Yablonovitch, 1999) และผิวหน้าแบบหนึ่งระนาบ (uni-planar) (F.-R. Yang, K.P. Ma, Y. Qian, and T. Itoh, 1999) แสดงดังรูปที่ 3.12 (ก) และ (ข) ตามลำดับ รูปที่ 3.13 (ก) แสดง EBG เส้นส่งผ่านพลังงานแบบ 1 มิติที่เป็นเส้นไมโครสตริปกับช่องกลมบนระนาบกราวด์ (V. Radisic, Y. Qian, R. Coccioli, and T. Itoh, 1998) และในรูปที่ 3.13 (ข) แสดง EBG เส้นส่งผ่านพลังงานแบบ 1 มิติ ที่เส้นส่งผ่านพลังงานประกอบด้วยส่วนทางขวามือ และทางซ้ายมือ (C. Caloz and T. Itoh, 2005)

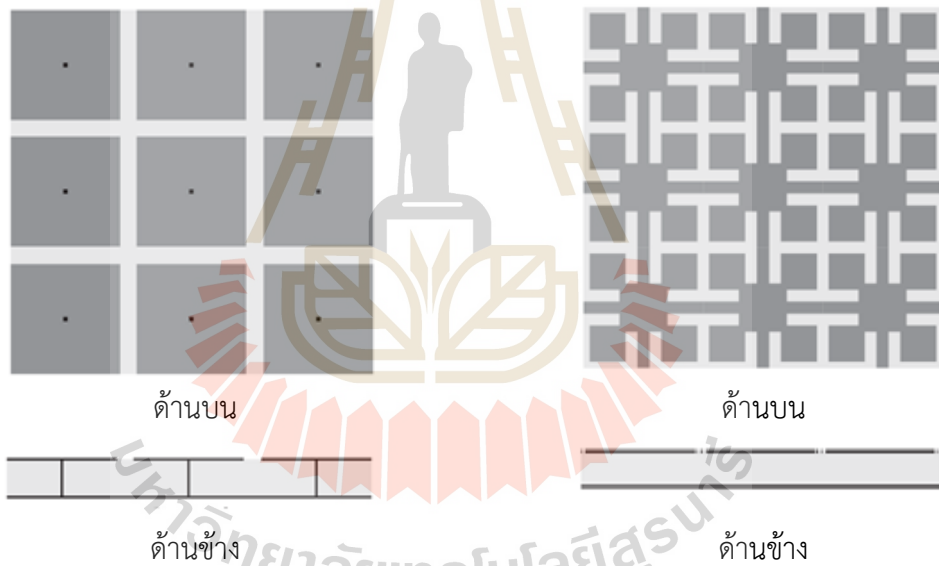


(ก) โพรงเป็นลักษณะแบบก่องฟีน



(ข) โพรงเป็นแถวลำดับแบบม้านั่งที่มี 3 ขา

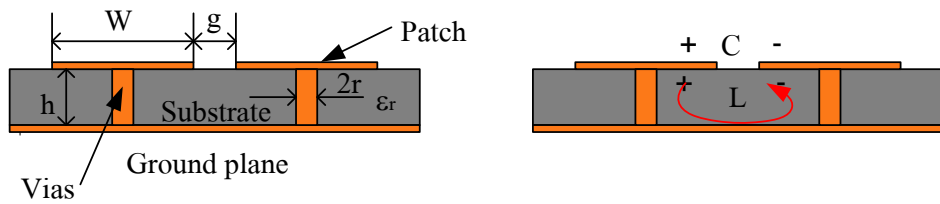
รูปที่ 3.11 โพรงของ EBG แบบ 3 มิติ



(ก) ผิวหน้าคล้ายดอกเห็ด

(ข) ผิวหน้าแบบหนึ่งระนาบ

รูปที่ 3.12 EBG แบบ 2 มิติ



รูปที่ 3.13 พารามิเตอร์และรูปแบบของค่าเหนี่ยวนำและค่าความจุของโพรง EBG

จากรูปที่ 3.13 แสดงโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโพรง EBG ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

- W คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำด้านบน
- g คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำด้านบน
- h คือ ความสูงของฐานรองไดอิเล็กตริก
- ϵ_r คือ ค่าคงที่สภาพยอมของไดอิเล็กตริก
- r คือ รัศมีของเวีย

$W + g$ คือ ระยะคาบเล็กที่เปรียบเทียบการดำเนินการความยาวคลื่น

จากรูปที่ 3.13 สามารถอธิบายรูปแบบสี่เหลี่ยมของโพรง EBG ได้ด้วยวงจรสมมูลของวงจรที่ประกอบไปด้วยค่าเหนี่ยวนำ (L) และค่าความจุ (C) โดยค่าความจุที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำด้านบน และค่าเหนี่ยวนำเกิดจากกระแสที่ไหลไปตามตัวนำที่อยู่ใกล้กัน

ในการประยุกต์ใช้งานของโพรง EBG ทางด้านสายอากาศได้มีการพัฒนาเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะในส่วนของอุปกรณ์การสื่อสารแบบไร้สายที่ทันสมัย (Modern Wireless Communication device) อุปกรณ์นำทางในระบบระบุตำแหน่งบนพื้นโลก (Global Positioning System) หรือ GPS ใน โทรศัพท์เคลื่อนที่ (Ranging From Cell Phone to Portable GPS Navigators) และการ์ดเครือข่ายของคอมพิวเตอร์ โน้ตบุ๊กที่รับสัญญาณจากดาวเทียมโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Network Cards of Laptops to Receivers of Satellite TVs) ในการพัฒนาด้านสายอากาศนั้นจะทำการออกแบบให้สายอากาศมีโครงสร้างที่ง่าย ขนาดกะทัดรัด มีความกว้างแถบที่กว้าง และมีฟังก์ชันการใช้งานที่หลากหลาย โดยได้มีการปรับปรุงสายอากาศให้ดีขึ้นในส่วนของวงจรขจัดคลื่นผิวของสายอากาศ การออกแบบสายอากาศให้มีประสิทธิภาพโดยมีโครงสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ

3.6 ตัวกลางแบบเส้นลวด (Wire Medium)

ตัวกลางแบบเส้นลวด (wire medium) เป็นโครงสร้างที่มีคุณสมบัติทางด้านอภิวัดและเป็นชนิดของวัสดุช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า (Burghignoli *et al.*, 2008) ครอบคลุมเดียวกับ EBG แบบสามมิติแบบกึ่งพื้น (Antonio *et al.*, 2013) โดยโครงสร้างของตัวกลางแบบเส้นลวดเกิดจากการจัดเรียงเส้นลวดขนาดเล็กขนานกันเป็นชั้นๆ ฝังตัวลงในตัวกลางไดอิเล็กตริก ซึ่งตัวกลางแบบเส้นลวดนี้ได้มีการศึกษาตั้งแต่ปี 1950 ตัวกลางแบบเส้นลวดเป็นที่ทราบกันดีว่าเป็นโครงสร้างวัสดุที่ถูกออกแบบมาใช้ในย่านความถี่พลาสมา (plasma frequency) และมีคุณสมบัติที่ทำให้เกิดค่ามีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าหรือค่าซึมซาบแม่เหล็กมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ (Forati *et al.*, 2008) การนำตัวกลางแบบ

เส้นลวดมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศนั้นได้ถูกนำเสนอโดย Tomaz และคณะ (2013) ซึ่งนำสื่อตัวกลางแบบเส้นลวดมาทำการปรับปรุงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรโดยทำการออกแบบสื่อตัวกลางแบบเส้นลวดที่ประกอบด้วยจำนวนชั้นของเส้นลวดที่วางเรียงกันจำนวนห้าชั้นโดยเส้นลวดถูกวางฝังอยู่ในไอทีเล็กทรอนิกส์ไทรโพนโมโดยจากผลการทดสอบพบว่าสามารถทำให้สภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศเพิ่มสูงขึ้นและลดระดับของพู่ข้างลงแต่ในขณะเดียวกันนั้นพบว่าอัตราการขยายของสายอากาศมีค่าน้อยกว่าสายอากาศปากแตรแบบเดิม นอกจากนี้ Al-Nuaimi และคณะฯ (2014) ได้ทำการนำเสนอการพัฒนาสายอากาศปากแตรรูปโดยทำการลดขนาดความยาวของสายอากาศลงโดยที่ขนาดของปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศยังคงมีขนาดเท่าเดิมเพื่อทำการปรับปรุงสภาพให้ได้สภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยนำเทคนิคตัวกลางแบบเส้นลวดมาวางปิดปากอะเพอร์เจอร์สายอากาศปากแตรรูปกรวยจากการทดสอบพบว่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศเพิ่มและอัตราการขยายของสายอากาศมีค่าใกล้เคียงกับสายอากาศแบบเดิมแต่สามารถลดขนาดของสายอากาศลงได้ครึ่งหนึ่ง จากการศึกษาสามารถสรุปจุดเด่นของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดสามารถจัดส่วนประกอบของกราวด์เพลนเพื่อป้องกันการแพร่กระจายของคลื่นผิว (surface waves) อีกทั้งโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดนั้นมีโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อนและมีคุณสมบัติในการปรับปรุงประสิทธิภาพต่างๆ ของสายอากาศเช่น เพิ่มสภาพเจาะจงทิศทางให้สูงขึ้น, เพิ่มอัตราการขยายสายอากาศ อีกทั้งยังเพิ่มประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ตัวกลางแบบเส้นลวดประกอบด้วยรูปทรงอยู่ 2 แบบคือ แบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 3.14 สื่อตัวกลางแบบเส้นลวดได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางในงานด้านการออกแบบเลนส์ในย่านความถี่ไมโครเวฟและปฏิบัติการการสังเคราะห์ของพื้นผิว สื่อตัวกลางแบบเส้นลวดโดยปกติจะอธิบายที่ความถี่ต่ำของวัสดุในแนวแกนเดียวซึ่งแสดงความสัมพันธ์สภาพยอมแบบดิยาติกส์ (relative permittivity dyadic) โดยสามารถเขียนสมการดังนี้ (เส้นลวดวางตามแนวแกน z)

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \varepsilon_h (u_x u_x + u_y u_y) + \varepsilon_z u_z u_z, \quad (3.31)$$

โดยที่

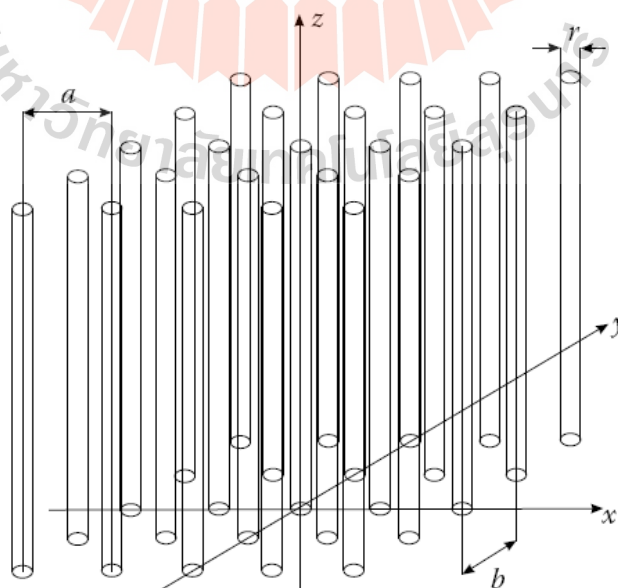
$$\varepsilon_z = \varepsilon_h \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 \varepsilon_h} \right),$$

ในขณะที่

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{WM} = \varepsilon_0 \varepsilon_{rh} \left(1 - \frac{k_p^2}{\varepsilon_{rh} k_0^2 - k_y^2} \right) \quad (3.32)$$

เมื่อ ϵ_h คือสภาพยอมของโฮสต์ตัวกลาง (permittivity of the host medium), $k = \omega/c\sqrt{\epsilon_h}$ $= k_o\sqrt{\epsilon_h}$, และ c คือความเร็วแสง(speed of light) ในส่วน ω_p หรือ k_p คือ ค่าที่อยู่ในรูปแบบหรือวงจรสมมูลความถี่พลาสมา (plasma frequency) ซึ่งในบางครั้งตัวกลางแบบเส้นลวดก็ถูกเรียกว่าพลาสมาเทียม (artificial plasma)

ความสนใจในตัวกลางแบบเส้นลวดกลับมาได้รับความนิยมนี้อีกครั้งในช่วงท้ายของทศวรรษที่ผ่านมาในการเชื่อมต่อกับวัสดุทางด้านวิศวกรรมที่มีพารามิเตอร์เชิงลบหรือบางครั้งเรียกวัสดุนี้ว่า DNG (Double Negative Medium) ซึ่งดัชนีหักเหเป็นลบจึงเกิดจากค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (ϵ) และค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (μ) เป็นลบทั้งคู่ ($\epsilon < 0$ และ $\mu < 0$) วัสดุ DNG (Double Negative Medium) ได้ถูกนำเสนอโดย Smith และคณะฯ ได้อธิบายไว้ว่ามันประกอบด้วยแถบโลหะยาว (long metal strips) และแถบแม่เหล็กแบนรูปวงแหวนแยก (split-ring resonator) ในปัจจุบันนี้สื่อตัวกลางแบบเส้นลวดถือได้ว่าเป็นวัสดุเทียมที่ถูกระบุว่าเป็นโครงสร้างวัสดุที่มีคุณสมบัติทางด้านอภิวัดสำหรับประยุกต์ใช้งานในงานด้านความถี่ไมโครเวฟและงานด้านความถี่แสง อย่างไรก็ตามในการพิจารณาคุณสมบัติของสื่อตัวกลางแบบเส้นลวดยังคงเริ่มต้นด้วยสมการพื้นฐานคือ สมการ Drude (สมการ 3.31) ซึ่งสมการดังกล่าวเป็นเพียงสมการเดียวที่ใช้ในการตรวจสอบการแพร่กระจายคลื่นเบื้องต้นของเส้นลวด อย่างไรก็ตามสมการดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าถ้าคลื่นเวกเตอร์ตามความยาวเส้นลวดมีองค์ประกอบไม่เท่ากับศูนย์ (nonzero component) จะกล่าวได้ว่าไม่เป็นรูปแบบทางกายภาพของพลาสมา ดังนั้นรูปแบบพลาสมาได้ถูกแก้ไขโดยการนำการพิจารณาในรูปแบบการกระจายตัวเชิงพื้นที่ (spatial dispersion) มาแทนที่ในสมการที่ 3.31



รูปที่ 3.14 โครงสร้างสื่อตัวกลางแบบเส้นลวด

3.5.1 ความถี่พลาสมาสำหรับตัวกลางแบบเส้นลวด

ความถี่พลาสมาที่มีความสอดคล้องกับความหนาแน่นอิเล็กตรอนดังสมการ 3.33

$$\omega_p^2 = \frac{ne^2}{\epsilon_0 m_{eff}}, \quad (3.33)$$

โดยที่ n คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอน
 e คือการประจุของอิเล็กตรอน
 m_{eff} คือประสิทธิภาพของอิเล็กตรอน

โดยทั่วไปโลหะค่า ω_p มักจะอยู่ในช่วงความถี่อัลตราไวโอเล็ต ซึ่งเป็นเหตุผลการลดความถี่พลาสมาในย่านความถี่ไมโครเวฟที่ผ่านเส้นลวดขนาดเล็กกว้างเรียงกันในโครงสร้าง 2 มิติของสื่อตัวกลางแบบเส้นลวด จากนั้นจะเกิดการรวมของอิเล็กตรอนตามแนวยาวของเส้นลวด ซึ่งความหนาแน่นการทำงานของอิเล็กตรอนจะได้

$$n_{eff} = n \frac{\pi r^2}{a^2}, \quad (3.34)$$

โดยที่ a คือระยะห่างระหว่างเส้นลวด และ r คือรัศมีของเส้นลวด จากสมการแสดงให้เห็นว่าในทางตรงกันข้ามกับกรณีของพลาสมาธรรมชาติ ซึ่งเป็นค่าแรงที่กระทำต่ออิเล็กตรอน แต่มีการทำงานกับส่วนที่เหลือของมวลอิเล็กตรอนโดยเกิดการเหนี่ยวนำบนของโครงสร้างของเส้นลวดอีกด้วย นอกจากนี้ผลของการเหนี่ยวนำตัวเองมากเกินไปเกินกว่าผลของมวลส่วนที่เหลือและอีกหนึ่งอย่างสุดท้ายที่สามารถละทิ้งคือโลหะความนำสูงในย่านความถี่ไมโครเวฟ หลังจากสององค์ประกอบทั้งความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและการลดลงของประสิทธิภาพมวล ซึ่งสามารถสรุปเป็นค่าสำหรับความถี่พลาสมา (k_p) ดังสมการ(3.35) เพื่อนำไปแทนค่าในสมการ(3.32) เพื่อคำนวณหาค่าความสัมพันธ์สภาพยอมของตัวกลางแบบเส้นลวด

$$k_p^2 = \frac{2\pi}{a^2 (\ln(a/2\pi r) + 0.5275)}, \quad (3.35)$$

3.5.2 การกระจายตัวเชิงพื้นที่สำหรับตัวกลางแบบเส้นลวด

ในความจริงสมมติว่าตัวกลาง (Medium) สามารถอธิบายได้โดย สมการดิยาติกส์ (สมการ 3.32) สมการการแผ่กระจายระนาบของคลื่น ($E_z \neq 0$) ด้วยคลื่นเวกเตอร์ $(q_x, q_y, q_z)^T$ นี้ในแกนเดียวกับไดอิเล็กตริก

$$\varepsilon_h (q_x^2 + q_y^2) = \varepsilon (k^2 + q_z^2), \quad (3.36)$$

ในทางตรงกันข้ามคลื่นพิเศษเหล่านี้สอดคล้องกับโหมด TM (แกน Z) โดยไม่แปรเปลี่ยนของเงื่อนไขขอบเขตตามแนวแกน z ดังนั้นสำหรับคลื่นพิเศษใด ๆ ที่เดินทางออกไปพร้อมกับค่าคงตัวของเฟส (q_z) ตามแนวแกน z สนาม E_z จะตอบสนองกับสมการ Helmholtz

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2} + (k^2 - q_z^2) \right\} E_z = 0, \quad (3.37)$$

สำหรับเงื่อนไขขอบเขต $E_z = 0$ บนเส้นลวดสามารถอธิบายด้วยสมการของระนาบที่ตอบสนองกับคลื่นพิเศษนี้ดังสมการ(3.38)

$$k(q_x, q_y, q_z) = \sqrt{k^2(q_x, q_y, 0) + q_z^2}, \quad (3.38)$$

ผลลัพธ์ที่ได้นี้ไม่สามารถใช้สำหรับสมการ(3.33) และ (3.36) ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้อย่างง่ายโดยการแทนสมการ(3.33) ลงในสมการ (3.36) อย่างไรก็ตามถ้าเราเลือกสมการ(3.29) แทนในสมการ (3.33) ดังนั้นสมการ (3.36) จะกลายมาเข้ากันได้กับสมการ (3.38) แล้วให้ใช้สมการการกระจายตัวสำหรับของคลื่นระนาบดังสมการ(3.40)

$$\varepsilon(k + q_z) = \varepsilon_h \left(1 - \frac{k_p^2}{k^2 - q_z^2} \right), \quad (3.39)$$

$$q^2 = q_x^2 + q_y^2 + q_z^2 = k^2 - k_p^2 \quad (3.40)$$

โดยที่เราสมมติ $q_z \neq k$ จากเหตุผลที่กล่าวไว้ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าสื่อตัวกลางแบบเส้นลวดสามารถอธิบายโดย สภาวะยอมอดิยาติกส์ (3.32) แต่แกนสภาวะยอมอดิยาติกส์จะต้องเป็นพารามิเตอร์กระจายตัวดังรูปแบบที่กำหนดในสมการ (3.39) โดยในสมการ (3.33) จะเป็นเพียงกรณีพิเศษของสมการ (3.39) ที่เหมาะสำหรับการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ x-y

ความแตกต่างหลักระหว่างรูปแบบพื้นที่ในทิศทางเดียวดังสมการ(3.33) กับรูปแบบนอกพื้นที่ดังสมการ(3.39) สำหรับสื่อตัวกลางแบบเส้นลวดนั้นเป็นไปในรูปแบบภายนอกพื้นที่โดยคาดการณ์ภายใต้ความถี่สำหรับการแพร่กระจายคลื่นในลักษณะพิเศษตามทิศทางของตัวกลาง ในทางตรงกันข้ามสมการ (3.33) และ (3.36) ใช้สำหรับคาดการณ์การแพร่กระจายคลื่นลักษณะพิเศษที่ความถี่ใดๆ โดยให้ $q_z > k = \omega\sqrt{\epsilon_h\mu_h}$ ดังนั้นในการคาดการณ์ระหว่างสองรูปแบบนั้นให้คุณภาพของคำตอบที่ค่อนข้างแตกต่างกันมากถึงแม้ว่าจะใกล้เคียงกับความถี่คutoffของความถี่พลาสมา (ω_0) นั่นคือ nonlocality ถือได้ว่าเป็นส่วนประกอบความสัมพันธ์ที่นำเสนอผลต่อการตอบสนองของแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวกลางถึงแม้ว่าจะมีการจำกัดความยาวคลื่นขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญมากสำหรับค่าใดๆภายในตัวกลางจะมีอัตราส่วนเท่ากับ a/λ

ในการพิสูจน์ที่สำคัญของสมการ(3.33) จะขึ้นอยู่กับวิธีการของสนามพื้นที่ นอกจากมันจะแสดงในตัวกลางแบบเส้นลวดขนาดเล็กและ $q_z \neq k$ ในการกำหนดแบบรูปการแผ่พลังงานสามารถกำหนดได้ 2 รูปแบบคือแบบพื้นฐาน ($E_z = 0$) และแบบพิเศษ ($E_z \neq 0$) โดยที่คลื่นแบบพื้นฐานไม่ตอบสนองกับเส้นลวดและแพร่กระจายภายในโฮสต์ตัวกลาง สำหรับคลื่นแบบพิเศษจะแสดงสมการการกระจายได้อย่างชัดเจนและเชื่อมต่อกับคลื่นเวกเตอร์ $\mathbf{q} = (q_x, q_y, q_z)^T$ สำหรับจำนวนคลื่น (wave number) ของโฮสต์ไอโซทรอปิกส์

พิจารณาโหมดในตัวกลางแบบเส้นลวดโดยพิจารณาจากทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สมมติอย่างง่าย $q_x = 0$ และแทนสมการ (3.32) ลงในสมการแมกซ์เวลล์เราสามารถแยกออกเป็นสองระบบย่อยโดยอธิบายคลื่นแบบพื้นฐานและแบบพิเศษ สำหรับคลื่นพื้นฐานแสดงดังสมการสมการ(3.41) และ(3.42) แสดงผลกระทบจากปัจจัยการแพร่กระจายคลื่นคือ $q_z^2 = k^2 - q_y^2$ แต่ไม่มีผลกระทบกับเส้นลวดสำหรับคลื่นแบบปกติ

$$-q_z H_y + \frac{k^2 - q_y^2}{k_0 \eta} E_x = 0, \quad (3.41)$$

$$q_z E_x - k_0 \eta H_y = 0, \quad (3.42)$$

สมมุติ $q_z \neq 0$ สำหรับสนามของคลื่นแบบพิเศษซึ่งเป็นกรณีที่น่าสนใจโดยพิจารณาตามสมการที่(3.41) และ(3.42)

$$q_z E_y + \frac{k_0^2 \varepsilon_z - q_y^2}{k_0 \varepsilon_z} \eta H_x = 0, \quad (3.43)$$

$$q_z H_x + \frac{k_0^2 \varepsilon_h}{\eta} E_y = 0, \quad (3.44)$$

ซึ่งให้สมการของคลื่นสำหรับสนามแม่เหล็ก (H_x) หลังจากกำจัด E_y และ E_z จะได้

$$\left[k^2 - \frac{q_y^2}{\varepsilon_z} - q_z^2 \right] H_x = 0, \quad (3.45)$$

เนื่องจาก

$$\left[k^2 - q_z^2 \right] \left[k^2 - q_y^2 - q_z^2 - k_p^2 \right] H_x = 0, \quad (3.46)$$

ดังนั้นจึงได้สมการความสัมพันธ์กระจาย 2 ความสัมพันธ์ดังสมการ (3.47) ซึ่งทั้งสองความสัมพันธ์เป็นอิสระต่อกันโดยแสดงในรูปแบบของ โหมด TEM และโหมด TM

$$k^2 = q_z^2, k^2 = q_y^2 + q_z^2 + k_p^2 = 0, \quad (3.47)$$

ตามสมการ(3.31) นั้นการแพร่กระจายของโหมด TM คือไอโซทรอปิกส์ในระนาบ yz อย่างไม่จำกัดตามมันสามารถแสดงได้จากข้อสรุปพื้นฐานดังสมการ (3.36) และ(3.38)

3.6 สรุป

ในบทนี้ได้ทำการอธิบายถึงทฤษฎีที่มีความจำเป็นต่อการออกแบบและพัฒนาสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดและซึ่งในเนื้อหาได้กล่าวถึงการศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับสายอากาศปากแตรและการออกแบบสายอากาศปากแตรประเภทต่างๆ ต่อจากนั้นทำการศึกษาทฤษฎีและหลักการของอภิวัดสุดท้ายที่ได้อธิบายในบทนี้คือทฤษฎีและหลักการของตัวกลางแบบเส้นลวดซึ่งถือได้ว่าเป็นเทคนิคหลักที่นำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบสำหรับงานวิจัยนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศปากแตรรูปกรวย โดยทฤษฎีดังกล่าวในบทนี้ถือได้ว่ามีความสำคัญต่อการออกแบบพัฒนาสายอากาศสำหรับงานวิจัยในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4

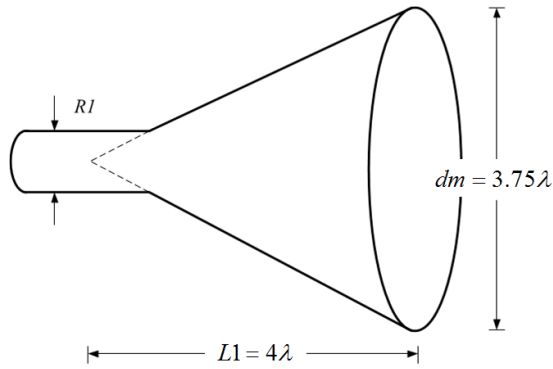
ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

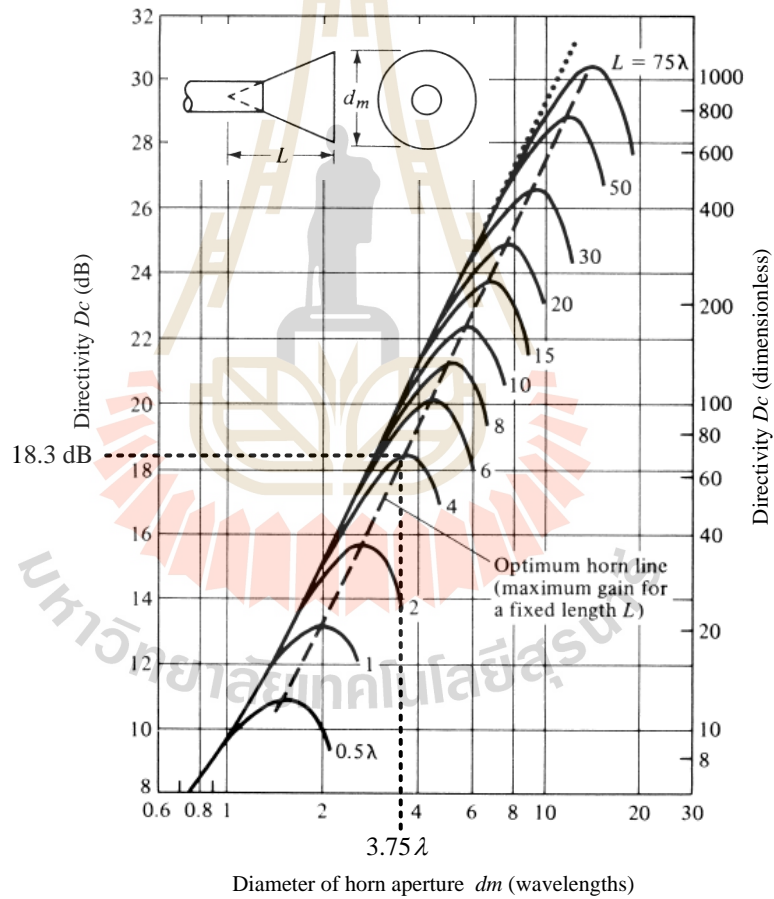
เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลการทดลองสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติของวัสดุในรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศปากแตรรูปกรวย ซึ่งในบทนี้จะประกอบด้วยเนื้อหาดังต่อไปนี้คือ การออกแบบและวิเคราะห์การเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยการนำเทคโนโลยีวัสดุเพื่อประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยในการเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศ โดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ในการวิเคราะห์ผลการออกแบบและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศและในส่วนสุดท้ายของบทนี้ก็จะได้ทำการสรุปสิ่งที่ได้จากการศึกษาและวิเคราะห์ผลต่อไป

4.2 การออกแบบสายอากาศปากแตรรูปกรวย

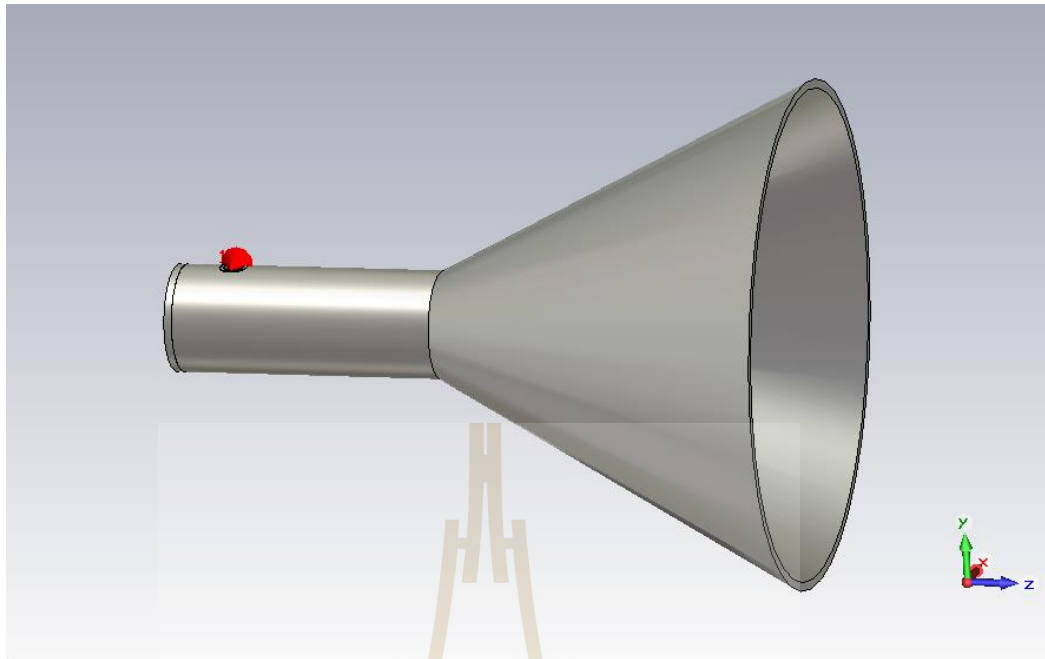
ในหัวข้อนี้กล่าวถึงการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานที่มีความถี่ 10 GHz ซึ่งทำการออกแบบและคำนวณโดยอ้างอิงจากทฤษฎีที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 และทำการวิเคราะห์ผลการออกแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave studio โดยโครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานที่ทำการออกแบบได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งในการออกแบบและกำหนดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศปากแตรรูปกรวย ทำโดยอาศัยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตร (dm) กับความยาวของสายอากาศปากแตร ($L1$) ที่ส่งผลต่ออัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยดังแสดงในรูปที่ 4.2 ในการกำหนดพารามิเตอร์ของสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐานที่ออกแบบได้ทำการเลือกขนาดความยาวของสายอากาศปากแตร ($L1$) = 4λ แล้วทำการพิจารณาหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศจากกราฟในรูปที่ 4.2 จะได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตร (dm) มีค่าเท่ากับ 3.75λ ซึ่งจะทำให้สายอากาศปากแตรรูปกรวยมีค่าสภาวะเงาเชิงทิศทางประมาณ 18.3 dBi ซึ่งในการออกแบบได้นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปทำการจำลองการออกแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญอื่นๆ ต่อไป



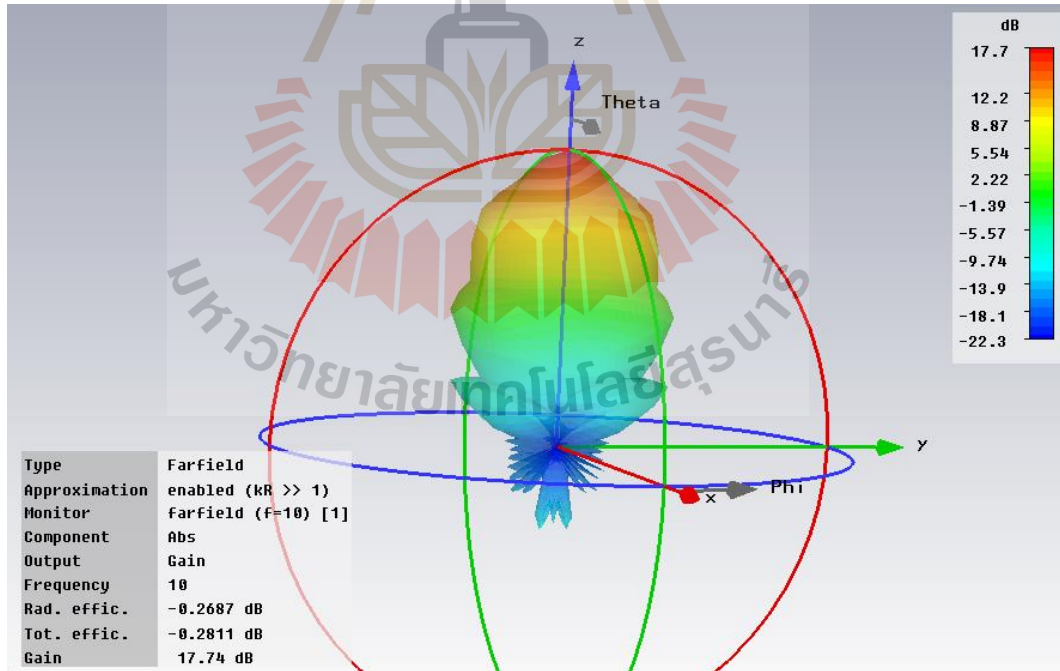
รูปที่ 4.1 โครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน



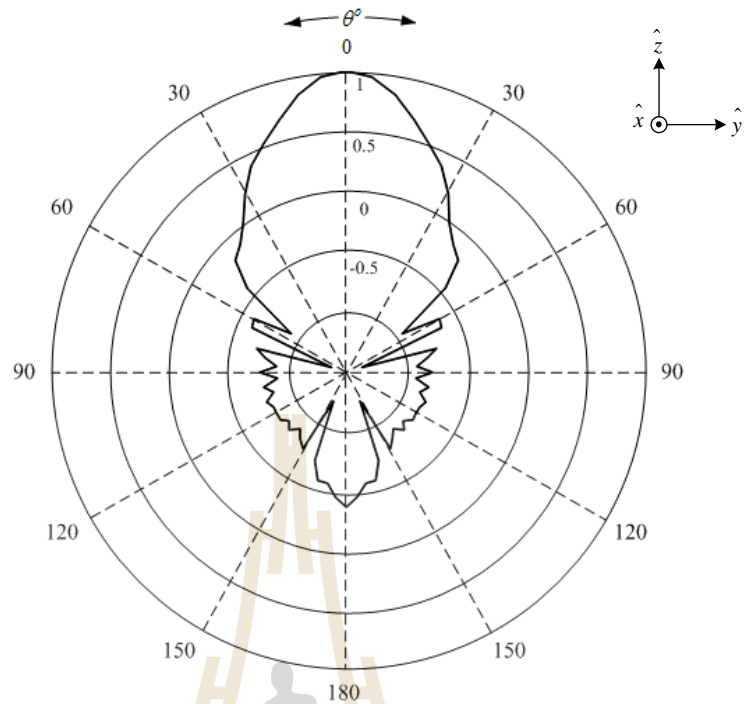
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตรรูปกรวย (d_m) กับความยาวของสายอากาศปากแตร (L_1) ที่ส่งผลต่ออัตราขยายของสายอากาศ



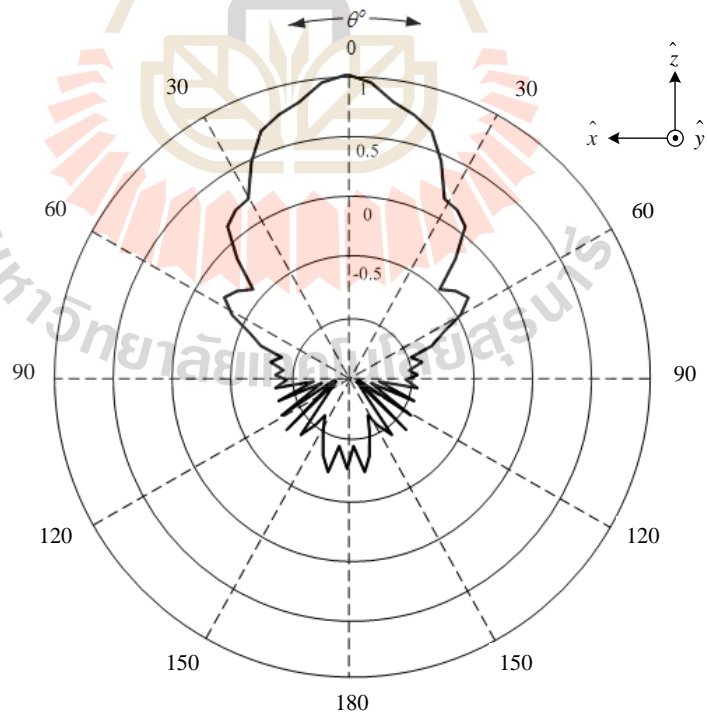
รูปที่ 4.3 โครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานที่ทำการจำลองการออกแบบด้วยโปรแกรม CST



รูปที่ 4.4 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบ 3 มิติของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานที่ทำการจำลองการออกแบบด้วยโปรแกรม CST



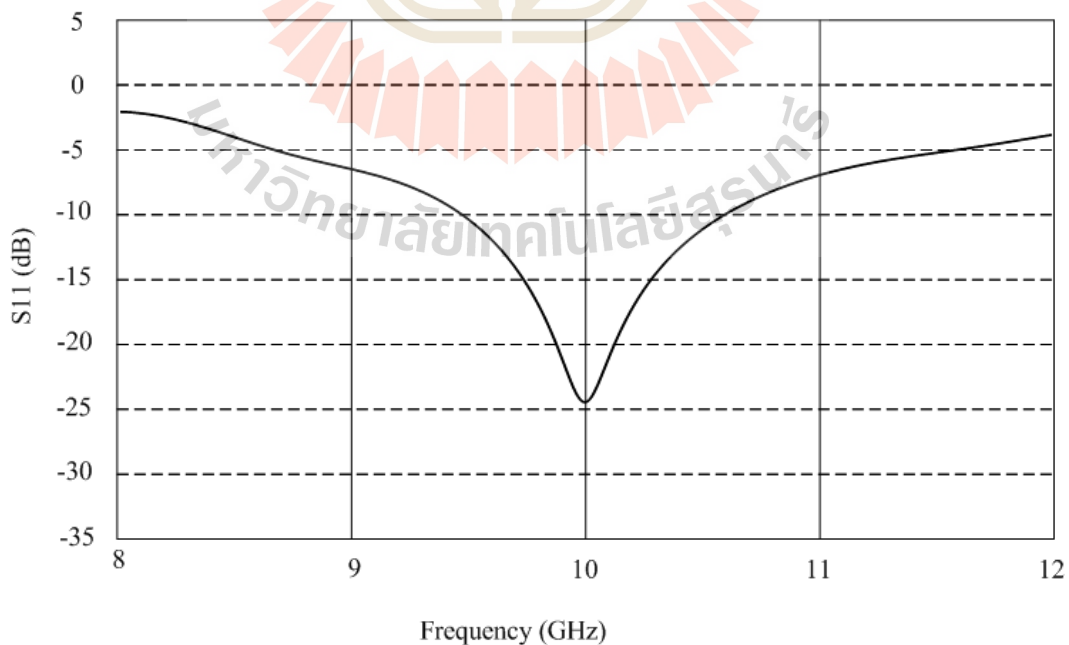
(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.5 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน

จากรูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานที่ทำการจำลองการออกแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio จากการจำลองการออกแบบได้แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานในรูปที่ 4.4 โดยทำการแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบ 3 มิติที่ได้จากโปรแกรม CST และในรูปที่ 4.5 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานหรือออร์เมอไลซ์ (normalized) แล้ว ที่ความถี่ปฏิบัติการ 10 GHz พบว่าแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรที่ได้จำลองการออกแบบมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับ 18.4 dBi และอัตราขยายเท่ากับ 17.7 dB จากแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane) พบว่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (half-power beamwidth: HPBW) ที่ได้จากทั้ง 2 ระนาบมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่เกิดขึ้นไม่สมมาตรกัน โดยมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบสนามไฟฟ้าเท่ากับ 18.4° และระนาบสนามแม่เหล็กเท่ากับ 17.9° อีกทั้งระดับพูข้างของแบบรูปการแผ่พลังงานมีระดับในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กแตกต่างกัน โดยแสดงค่าที่ได้จากการจำลองในตารางที่ 4.1 จากแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานไม่สมมาตรซึ่งในงานวิจัยนี้มีความต้องการแบบรูปการแผ่พลังงานที่สมมาตรและระดับของพูข้างที่เกิดขึ้นต่ำ ซึ่งในหัวข้อต่อไปจะได้กล่าวถึงเทคนิคการปรับปรุงประสิทธิภาพแบบรูปการแผ่พลังงานและจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศค่า S_{11} ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานที่ออกแบบมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ -24.3 dB ที่ความถี่ 10 GHz ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน

ตารางที่ 4.1 ผลการจำลองค่าพารามิเตอร์สายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐาน

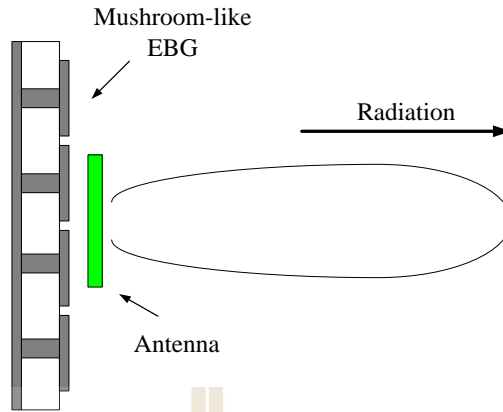
พารามิเตอร์	ผลการจำลอง
อัตราขยาย (Gain)	17.7 dB
สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)	18.4 dBi
สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11})	-24.62 dB
ระดับพู่ซ่างระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane SLL)	-29.4 dB
ระดับพู่ซ่างระนาบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (H-Plane SLL)	-22.7 dB

4.3 การปรับปรุงประสิทธิภาพสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติของวัสดุในรูปแบบโครงสร้างช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบดอกเห็ด (Mushroom-like Electromagnetic Band Gap)

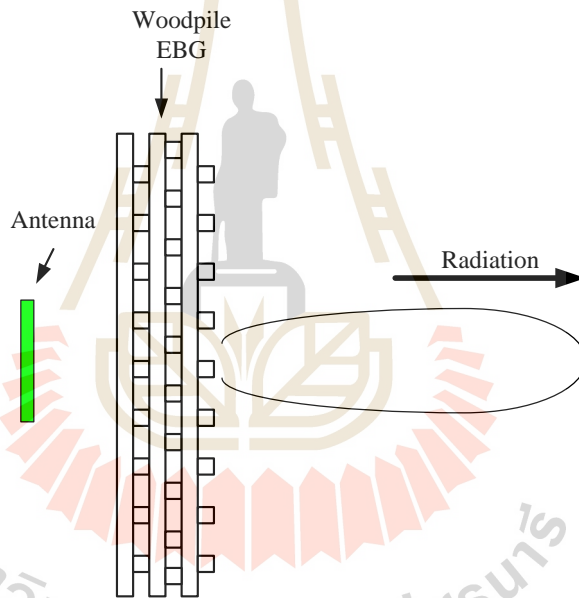
ในการปรับปรุงประสิทธิภาพสายอากาศปากแตรรูปกรวยนั้น ในการวิจัยนี้มีความสนใจในการนำเอาเทคโนโลยีคุณสมบัติของวัสดุมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศปากแตรรูปกรวย ซึ่งในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีดังกล่าวกำลังเป็นที่ได้รับความสนใจจากนักวิจัยทางด้านวิศวกรรมสายอากาศหรืองานวิจัยทางด้านความถี่ย่านไมโครเวฟ จากคุณสมบัติของวัสดุนั้นเป็นคุณสมบัติที่ไม่มีอยู่จริงในธรรมชาติโดยเกิดจากการจัดเรียงโครงสร้างในระดับนาโนซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ในหัวข้อนี้จะได้อธิบายถึงการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุในรูปแบบของโครงสร้างช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบดอกเห็ด ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวถือได้ว่าเป็นชนิดหนึ่งของวัสดุ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศปากแตรรูปกรวย

4.3.1 การพิจารณาวัสดุในรูปแบบของโครงสร้างโพรงช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบดอกเห็ด

ในหัวข้อนี้ได้อธิบายการเลือกใช้และออกแบบโพรงช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็ก (Electromagnetic Band Gap) หรือเรียกสั้นๆว่า EBG เพื่อนำมาใช้ประยุกต์ทำงานร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศให้ดีขึ้น จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่ผ่านมาในบทที่ 2 และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในบทที่ 3 นั้น พบว่า EBG ที่นิยมนำมาใช้ในการออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศนั้นมีอยู่ 2 ชนิด คือ EBG แบบดอกเห็ด (Mushroom-like EBG) กับ EBG แบบกองฟืน (woodpile EBG) ซึ่ง EBG ทั้ง 2 แบบนั้นมีคุณสมบัติของการนำมาประยุกต์ที่แตกต่างกัน



(ก) แบบดอกเห็ด(Mushroom-like EBG)



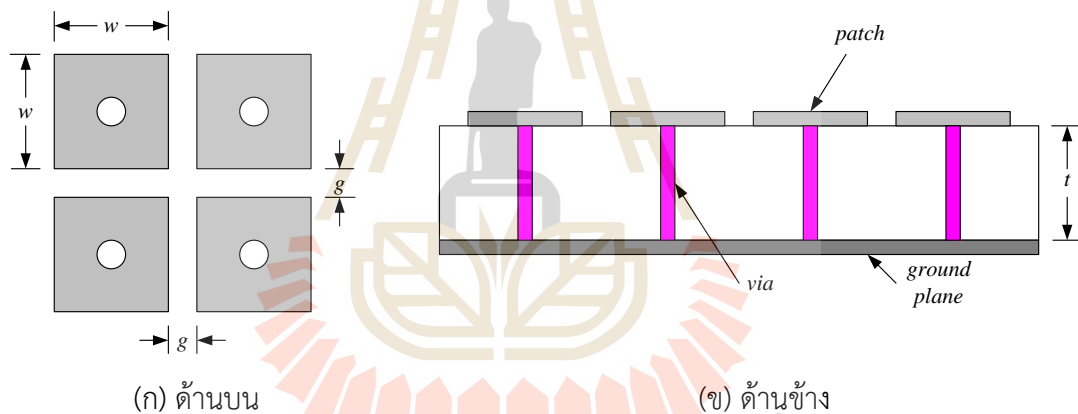
(ข) แบบแบบกองฟืน (Woodpile EBG)

รูปที่ 4.7 รูปแบบการประยุกต์ใช้งานระหว่างสายอากาศและโครงสร้างโพรงช่องว่าง
แถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า

โพรงช่องแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบดอกเห็ดนั้นการนำมาประยุกต์ใช้งานนั้นจะทำการกระตุ้นของสายอากาศจากด้านหน้า หรือวางในลักษณะคล้ายกับตัวสะท้อน (Reflector) ให้กับสายอากาศที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ก) และจุดเด่นอีกประการหนึ่งคือมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ออกแบบได้ง่าย ส่วน EBG แบบกองฟืนนั้นการนำมาประยุกต์ใช้งานนั้นการกระตุ้นของสายอากาศจะทำการกระตุ้นจากด้านหลัง โดยวางในลักษณะเป็นไดเรกเตอร์ (Director)

ข้อดีของการใช้ EBG แบบกึ่งพื้นนั้นสามารถช่วยเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศได้สูงมากเมื่อเทียบกับ EBG แบบดอกเห็ด แต่ข้อเสียของการนำ EBG แบบกึ่งพื้นมาใช้จำเป็นต้องวางห่างจากสายอากาศที่ใช้ในการกระตุ้นในระยะที่ห่างค่อนข้างมากจึงจะทำให้ EBG ทำงานได้ประสิทธิภาพสูง จึงเกิดปัญหาในด้านการออกแบบโครงสร้างในการติดตั้งสายอากาศร่วมกับ EBG อีกทั้งในการออกแบบโครงสร้างของ EBG แบบกึ่งพื้นนั้นสร้างจากการนำแท่งโลหะมาวางซ้อนกันดังรูปที่ 4.7 (ข) ทำให้น้ำหนักของสายอากาศเพิ่มสูงขึ้นตาม

การพิจารณาอภิวัดในรูปแบบโครงสร้างโพรงช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า ในการออกแบบได้พิจารณาเลือกใช้โพรงช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบดอกเห็ด (Mushroom-like Electromagnetic Band Gap) มาใช้งานมาประยุกต์ในการออกแบบร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวย เนื่องจากจุดเด่นของ EBG แบบดอกเห็ดคือมีโครงสร้างในการออกแบบไม่ซับซ้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.8

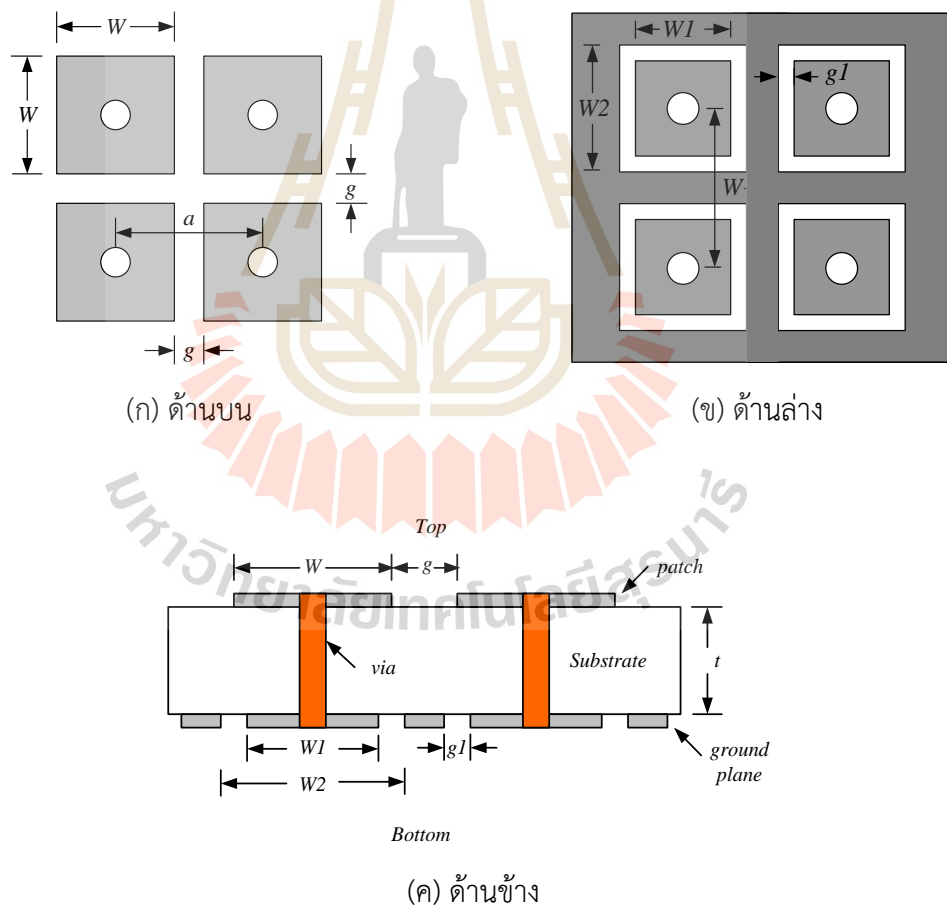


รูปที่ 4.8 โครงสร้างโพรงช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กแบบดอกเห็ด

การออกแบบโพรงช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กแบบดอกเห็ดโดยกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีค่าดังนี้ (Fan Yang, Yahya-Samii, 2006) ซึ่งใช้ค่าพารามิเตอร์อ้างอิงเริ่มต้นในการออกแบบโดยกำหนดให้ $W = 0.12\lambda$, $g = 0.02\lambda$, $t = 0.04\lambda$, $r = 0.005\lambda$ และ $\epsilon_r = 4.4$ จากที่ได้อธิบายข้างต้นนั้น จากคุณสมบัติของโพรงช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กแบบดอกเห็ดนั้นโดยทั่วไปมักนิยมนำมาประยุกต์ในการออกแบบร่วมกับสายอากาศนั้นต้องอาศัยการวางสายอากาศไว้ข้างหน้าของชุด EBG หรือในลักษณะเป็นตัวสะท้อน แต่ในการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบให้โครงสร้าง EBG แบบดอกเห็ดให้มีการกระตุ้นจากด้านหลัง โดยทำการประยุกต์โครงสร้าง EBG วางขวางแนวปากกระนาบปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตร จึงได้ทำการออกแบบพัฒนาและปรับปรุงโครงสร้าง

ของ EBG แบบดอกเห็ดให้สามารถทำงานในลักษณะที่ถูกกระตุ้นด้วยสายอากาศจากด้านหลังของ EBG หรือออกแบบให้ EBG วางหน้าปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศคล้ายกับ EBG แบบกองหิน

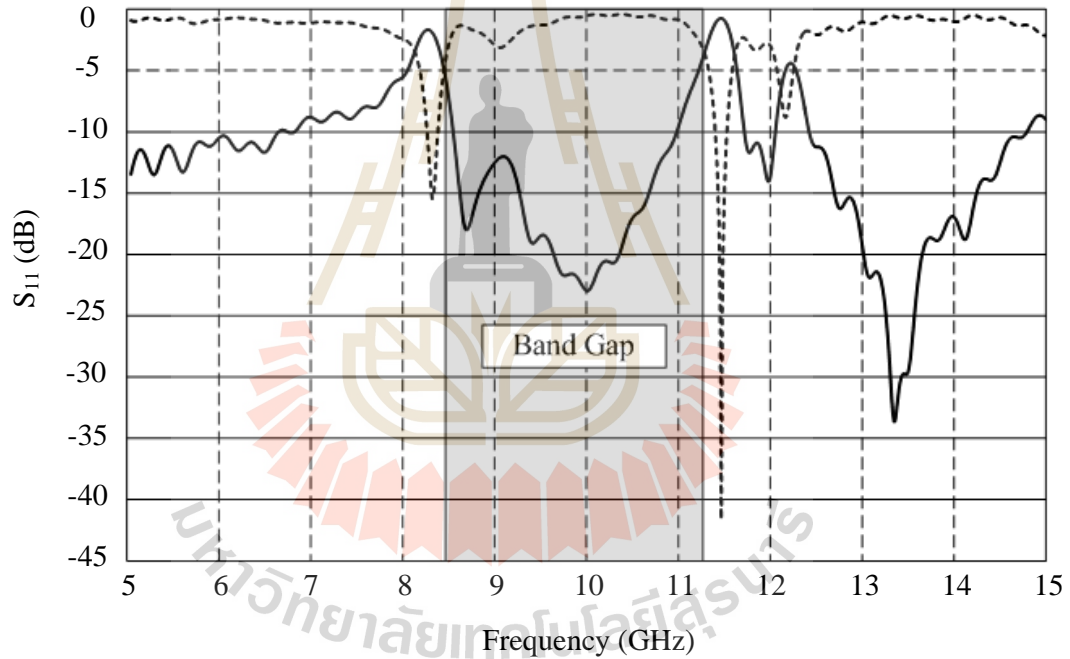
ในการปรับแต่งโครงสร้างของ EBG แบบดอกเห็ดเพื่อให้สามารถกระตุ้นจากด้านหลังของ EBG นั้นทำโดยการใช้เทคนิคการเซาะร่องในระนาบกราวด์ (Ground Plane) ของ EBG แบบดอกเห็ดให้เป็นร่องในลักษณะวงแหวนสี่เหลี่ยมเพื่อให้คลื่นที่เดินทางออกจากสายอากาศแผ่กระจายพลังงานผ่านทะลุจากระนาบกราวด์ของ EBG ออกไปยังด้านหน้าของ EBG โดยรูปแบบโครงสร้างในการปรับแต่งดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งในรูปที่ 4.9 (ก) แสดงโครงสร้างด้านบนของ EBG แบบดอกเห็ด ซึ่งยังคงรูปแบบเดิม ส่วนในด้านระนาบกราวด์หรือด้านหลังของ EBG แบบดอกเห็ดได้ดำเนินการตัดเซาะร่องรูปวงแหวนสี่เหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ข) และในรูปที่ 4.9 (ค) แสดงโครงสร้างด้านข้างของ EBG ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบและจำลองการทำงานดัง แสดงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.9 โครงสร้างโพรงช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กแบบดอกเห็ด (Mushroom-like EBG) ที่ดำเนินการปรับแต่งโดยการเซาะร่องรูปวงแหวนสี่เหลี่ยม

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างโพรงช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า

พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)
W	3.6
$W1$	4.1
$W2$	3.25
g	1
$g1$	0.85
Via diameter	1

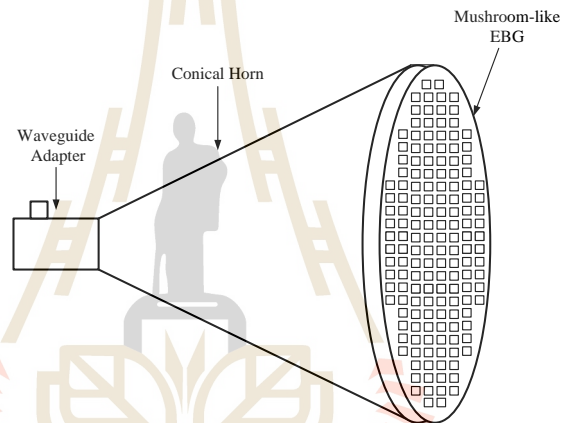


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงช่องว่างแถบความถี่ของโครงสร้างโพรงช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบดอกเห็ด

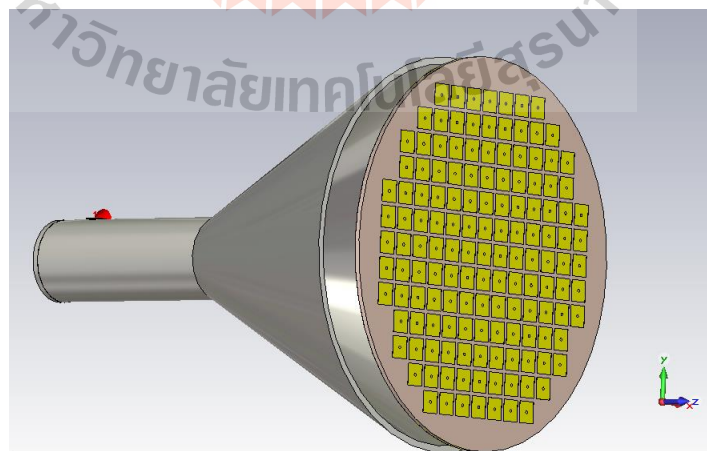
จากรูปที่ 4.10 เมื่อทำการพิจารณาโครงสร้างของ Mushroom-like EBG ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST เพื่อทดสอบการเรแนนซ์ความถี่ของโครงสร้าง Mushroom-like EBG พบว่าโครงสร้างดังกล่าวเรโซแนนซ์ความถี่ในช่วง 8.59 – 11.24 GHz

4.3.2 การออกแบบการประยุกต์ใช้ช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบดอกเห็ดร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน

ในการออกแบบในส่วนของการประยุกต์ใช้ช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบดอกเห็ด (Mushroom-like EBG) ร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยนั้น มีแนวทางในการออกแบบโครงสร้าง ดังแสดงในรูป 4.11 และ 4.12 โดยนำ EBG แบบดอกเห็ดที่ได้ทำการออกแบบและปรับปรุงโครงสร้าง โดยการเจาะร่องในระนาบกราวด์รูปวงแหวนสี่เหลี่ยมจัตุรัสตั้งหัวข้อที่ผ่านมา โดยในการนำ EBG แบบดอกเห็ดมาประยุกต์ทำงานร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวย โดยทำการนำโครงสร้างของ EBG แบบดอกเห็ดที่ทำการออกแบบและวิเคราะห์รูปแบบโครงสร้างที่เหมาะสมเรียบร้อยแล้วมาทำการวางวางหน้าปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตรรูปกรวย



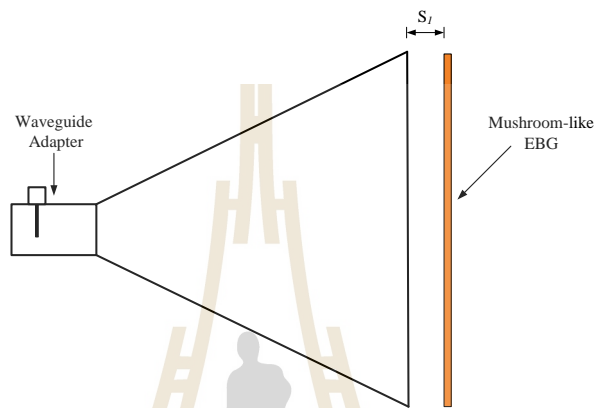
รูปที่ 4.11 โครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยที่พัฒนาทำงานร่วมกับช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบดอกเห็ด



รูปที่ 4.12 โครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยที่จะดำเนินการพัฒนาทำงานร่วมกับช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบดอกเห็ดที่ทำการจำลองการออกแบบด้วยโปรแกรม CST

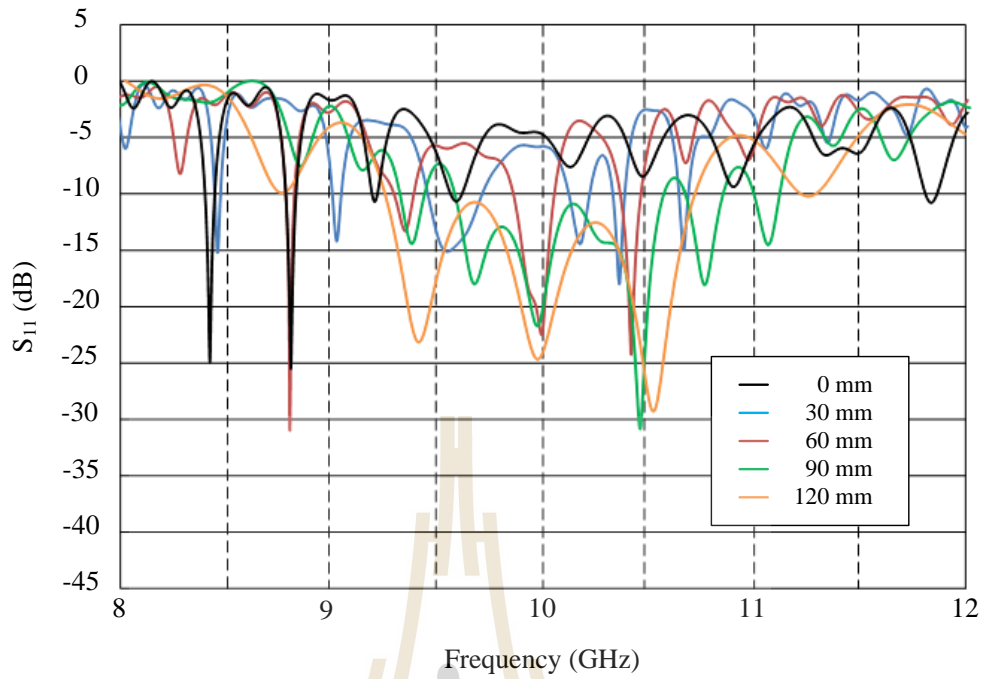
4.3.2.1 การพิจารณาระยะตำแหน่งการวางโครงสร้างช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กแบบดอกเห็ดหน้าปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตร

ในรูปที่ 4.13 ได้แสดงรูปแบบในการพิจารณาระยะตำแหน่งการวางโครงสร้างช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กแบบดอกเห็ดที่ปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตร เพื่อหาระยะตำแหน่งที่เหมาะสมในการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวย

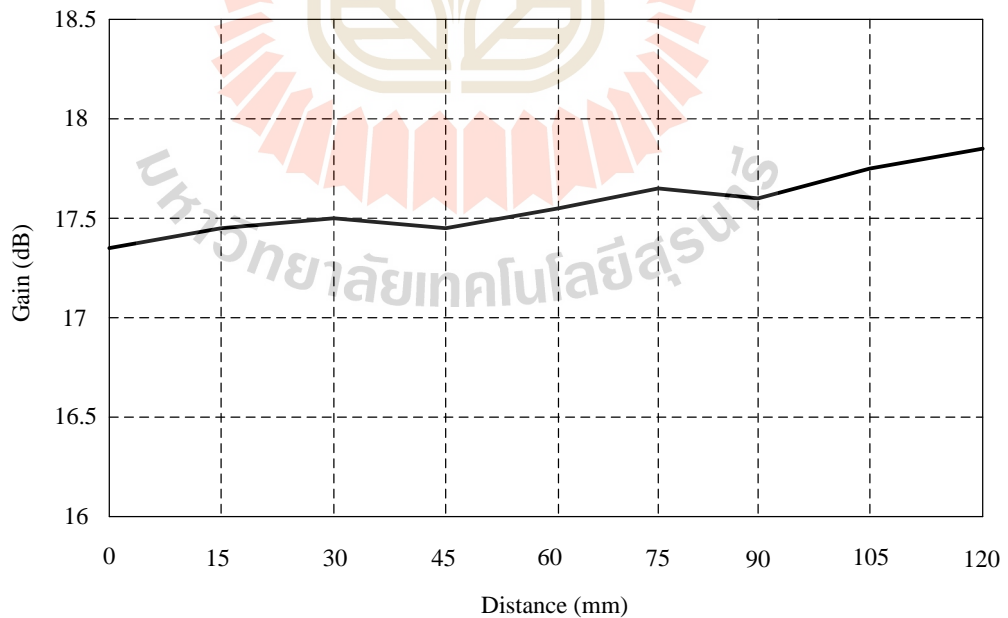


รูปที่ 4.13 รูปแบบการพิจารณาระยะห่างในการวางโครงสร้าง EBG ที่หน้าปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตรรูปกรวย

ในการพิจารณาระยะห่างในการวางโครงสร้าง EBG ที่ปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตรรูปกรวย ซึ่งได้ทำการพิจารณาระยะห่างในการวางโครงสร้าง EBG ดังนี้คือ 0 mm 30 mm 60 mm 90 mm และ 120 mm จากการจำลองระยะห่างในการวาง EBG ที่กำหนดเพื่อทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนต่างๆ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ตอบสนองกับความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่กลางของสายอากาศปากแตรที่ออกแบบคือ 10 GHz ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และเมื่อทำการพิจารณาในส่วนของอัตราขยายของสายอากาศที่ได้พบว่าอัตราขยายที่ได้จากระยะตำแหน่งการเลื่อนโครงสร้าง EBG ออกห่างจากแนวระนาบปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศที่ระยะต่างๆ ให้อัตราขยายของสายอากาศเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้บางช่วงระยะห่างทำให้อัตราขยายลดลงน้อยกว่าสายอากาศขนาดมาตรฐาน ในรูปที่ 4.15 ได้แสดงอัตราขยายของสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐานในกรณีนำโครงสร้าง EBG มาวางหน้าปากอะเพอร์เจอร์เพื่อเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศที่ระยะห่างต่างๆ จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST พบว่าที่ระยะตำแหน่งการวางโครงสร้าง EBG ที่หน้าปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตรสามารถเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4.14 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศปากแตรรูปกรวย ขนาดมาตรฐานกรณีสถิตโครงสร้าง EBG ห่างจากแนวระนาบปากอะเพอร์เจอร์ที่ ระยะต่างๆ

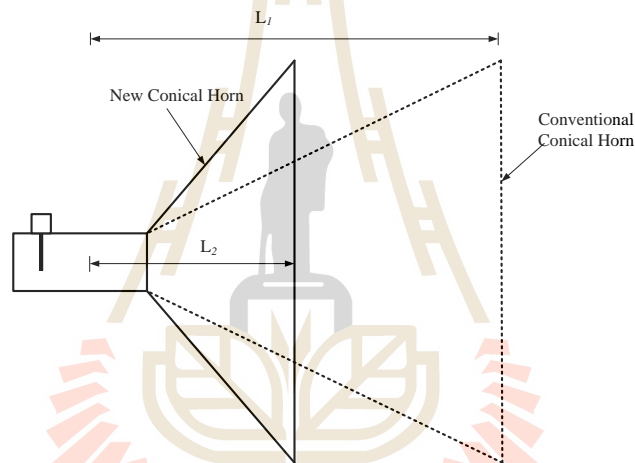


รูปที่ 4.15 อัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานกรณีสถิตโครงสร้าง EBG ห่างจากแนวระนาบปากอะเพอร์เจอร์ที่ระยะต่างๆ

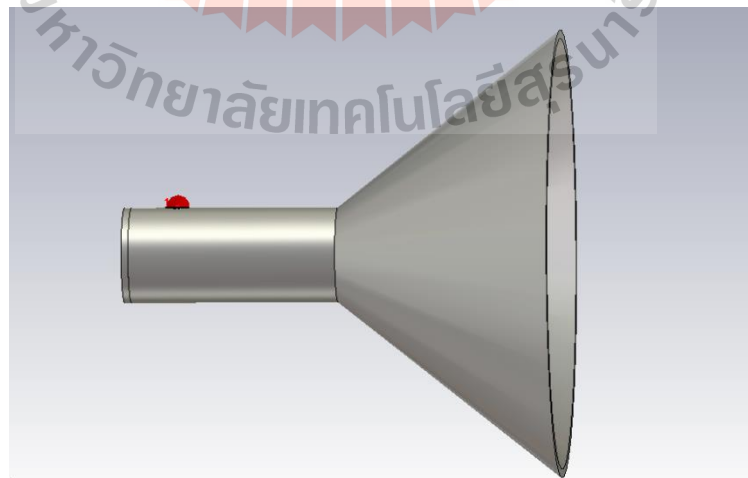
4.3.3 การออกแบบการประยุกต์ใช้ช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบดอกเห็ดร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานกรณีลดความยาวสายอากาศ

4.3.3.1 การพิจารณาลดขนาดความยาวของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน

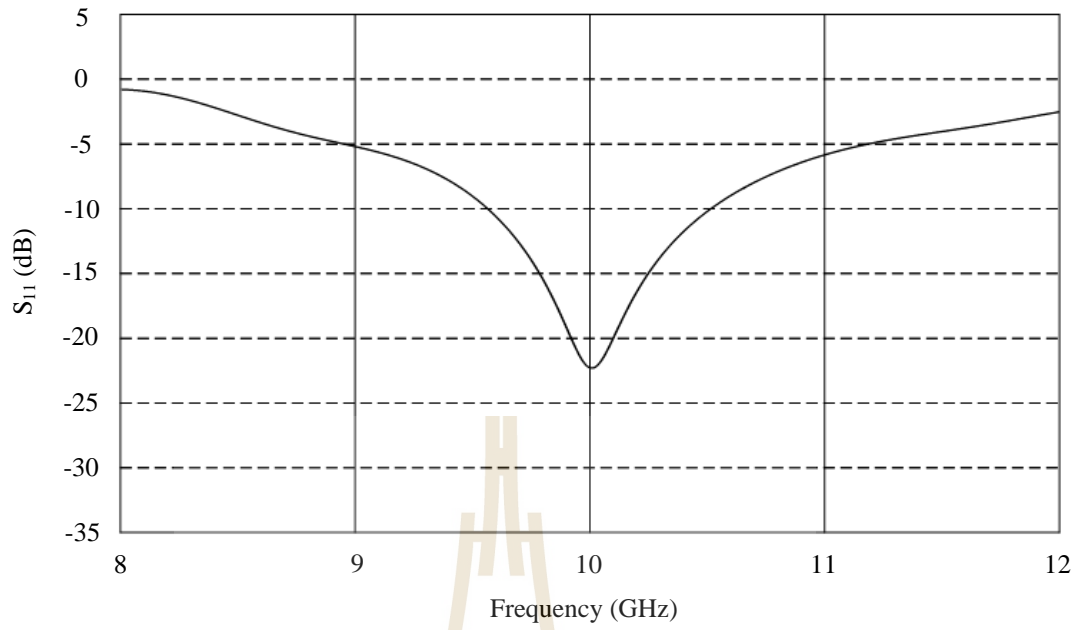
ในการพิจารณาลดขนาดความยาวของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน ได้ทำการลดความยาวของสายอากาศลงมาครึ่งหนึ่งของความยาวสายอากาศจากเดิม โดยขนาดความยาวของสายอากาศมาตรฐานมีความยาวเท่ากับ 120 มิลลิเมตร โดยทำการลดขนาดความยาวลงมาเท่ากับ 60 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.16 หลังจากนั้นได้ทำการจำลองวิเคราะห์การออกแบบสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานที่ทำการลดความยาวสายอากาศลงมาครึ่งหนึ่ง (60 mm) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ดังแสดงในรูปที่ 4.17



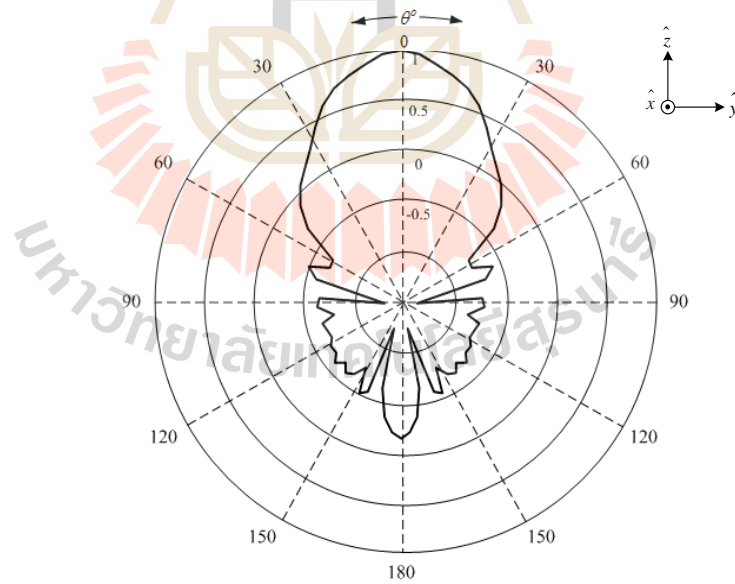
รูปที่ 4.16 โครงสร้างของสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีลดขนาดความยาวของสายอากาศ



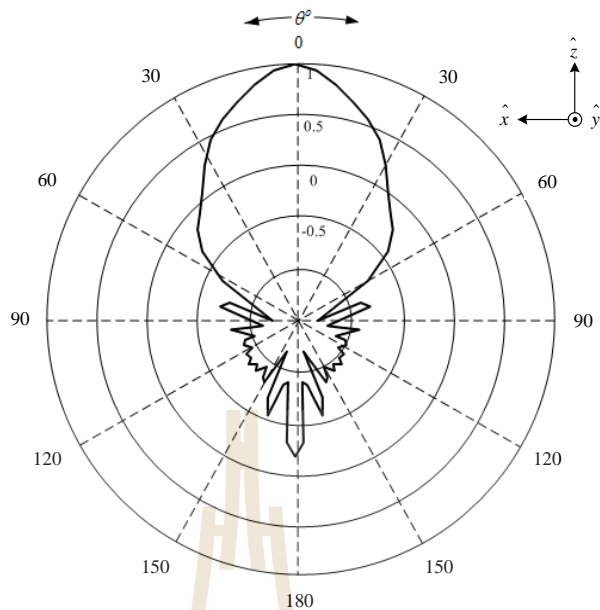
รูปที่ 4.17 โครงสร้างของสายอากาศปากแตรรูปกรวยที่ทำการลดขนาดความยาวของสายอากาศที่ทำการจำลองการออกแบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST



รูปที่ 4.18 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับสายอากาศปากแตรรูปกรวย
ขนาดมาตรฐาน



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.19 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีลดความยาวสายอากาศลงมา 50%

ตารางที่ 4.3 ผลการจำลองค่าพารามิเตอร์สายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐานกรณีลดความยาวสายอากาศลงมา 50%

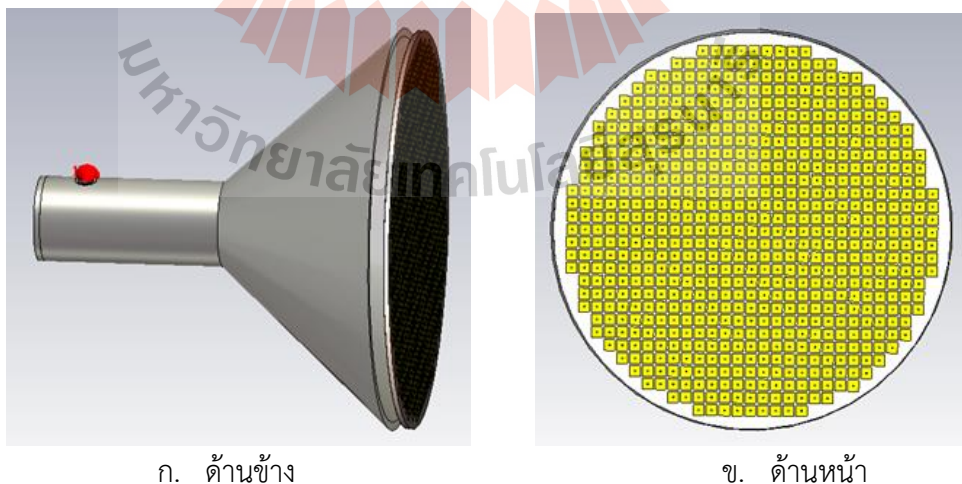
พารามิเตอร์	ผลการจำลอง
อัตราขยาย (Gain)	13.1 dB
สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11})	-22.46 dB
ระดับพู่ข้างระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane SLL)	-25.8 dB
ระดับพู่ข้างระนาบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (H-Plane SLL)	-26.3 dB

ในรูป 4.18 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) สายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐานกรณีลดความยาวของสายอากาศลงมาครึ่งหนึ่งของความยาวสายอากาศขนาดมาตรฐานพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่กลางของสายอากาศปากแตรที่ออกแบบคือ 10 GHz ในรูปที่ 4.19 ได้แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศ จากการจำลองการวิเคราะห์พบว่าเมื่อลดความยาวสายอากาศลงมาครึ่งหนึ่ง อัตราขยายของสายอากาศที่ได้เท่ากับ 13.1 dB ระดับพู่ข้างในระนาบไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กเท่ากับ -25.8 dB และ -26.3 dB ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 4.3

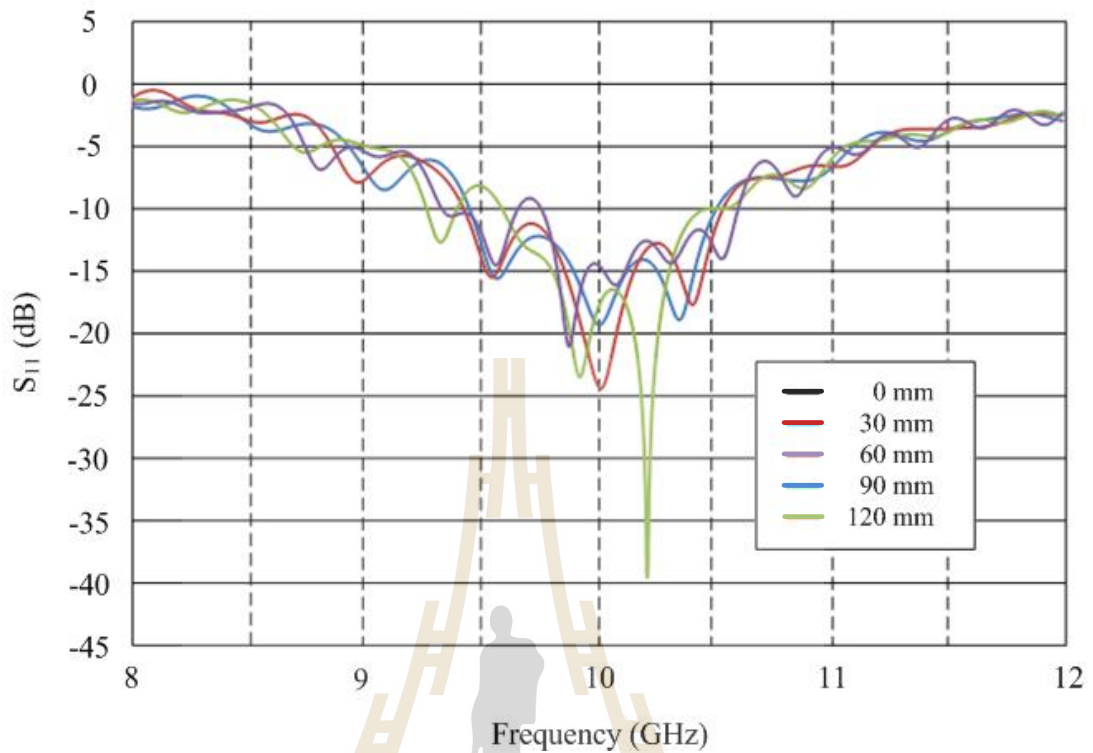
4.3.3.2 การประยุกต์โครงสร้าง EBG เพื่อเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานในกรณีลดความยาวของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอเทคนิคการเพิ่มอัตราขยายสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยนำโครงสร้าง EBG แบบดอกเห็ดคมาวางหน้าปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศที่ทำการลดขนาดความยาวของสายอากาศลงมาครึ่งหนึ่ง ในการวิเคราะห์ได้ทำการนำโครงสร้าง EBG ที่ผ่านการวิเคราะห์การเรโซแนนซ์ความถี่ปฏิบัติการในหัวข้อข้างต้นและทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการเพิ่มอัตราขยายสายอากาศ โดยทำการพิจารณาการวางโครงสร้าง EBG ห่างจากแนวระนาบปากอะเพอร์เจอร์สายอากาศปากแตรกรณีลดขนาดความยาวของสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐานลงเหลือครึ่งหนึ่งของความยาวปกติ

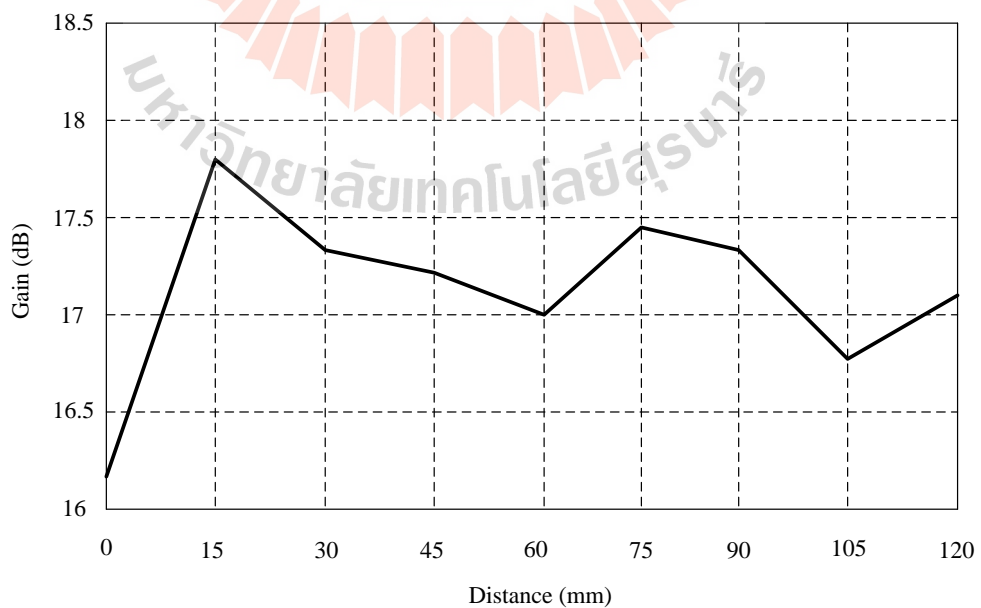
ในการพิจารณาระยะตำแหน่งการวางโครงสร้าง EBG ที่เหมาะสมโดยทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ดังแสดงในรูปที่ 4.20 โดยทำการเลื่อนระยะตำแหน่งการวางโครงสร้าง EBG ออกจากปากอะเพอร์เจอร์สายอากาศปากแตร คือ 0 mm 30 mm 60 mm 90 mm และ 120 mm จากการจำลองระยะห่างในการวาง EBG ที่กำหนด พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนต่างๆ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ตอบสนองกับความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่กลางของสายอากาศปากแตรที่ออกแบบคือ 10 GHz ดังแสดงในรูปที่ 4.21 และเมื่อทำการพิจารณาในส่วนของอัตราขยายของสายอากาศที่ได้พบว่าอัตราขยายที่ได้จากระยะตำแหน่งการเลื่อนโครงสร้าง EBG ออกห่างจากแนวระนาบปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศที่ระยะ 30 mm ให้อัตราขยายเท่ากับ 17.5 dB แต่ในระยะอื่นๆ พบว่าให้อัตราขยายน้อยกว่าสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน ดังแสดงในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.20 โครงสร้างของสายอากาศปากแตรรูปกรวยที่ทำการจำลองการออกแบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

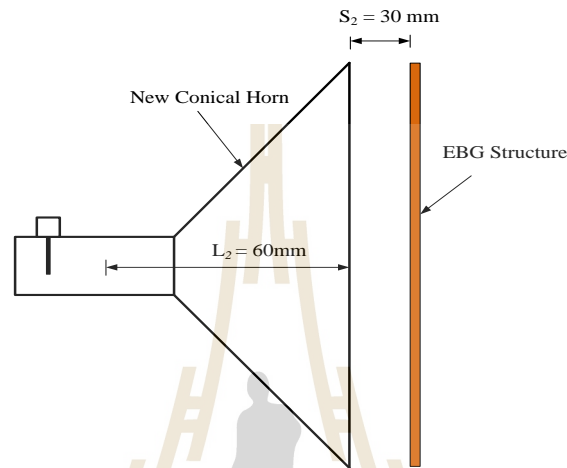


รูปที่ 4.21 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานกรณีวางโครงสร้าง EBG ห่างจากแนวระนาบปากอะเพอร์เจอร์ที่ระยะต่างๆ

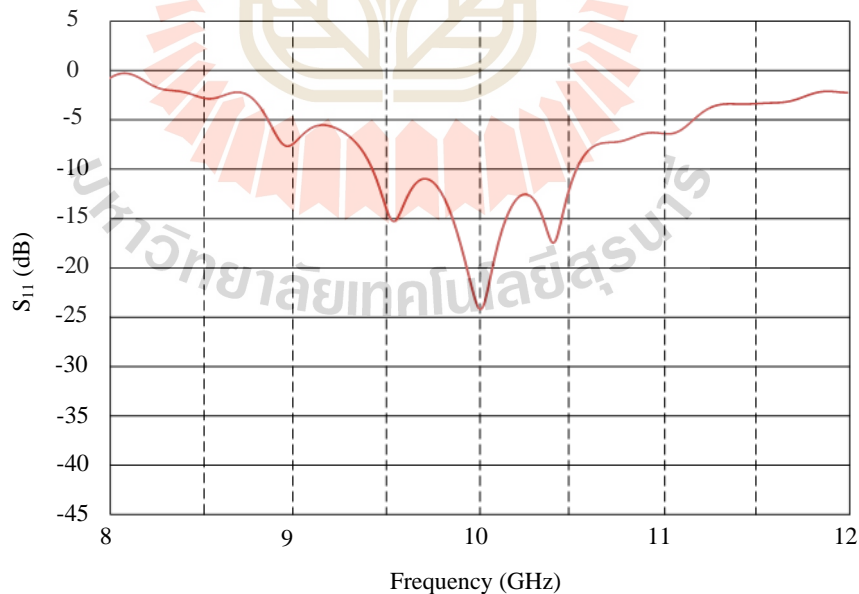


รูปที่ 4.22 อัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานกรณีวางโครงสร้าง EBG ห่างจากแนวระนาบปากอะเพอร์เจอร์ที่ระยะต่างๆ

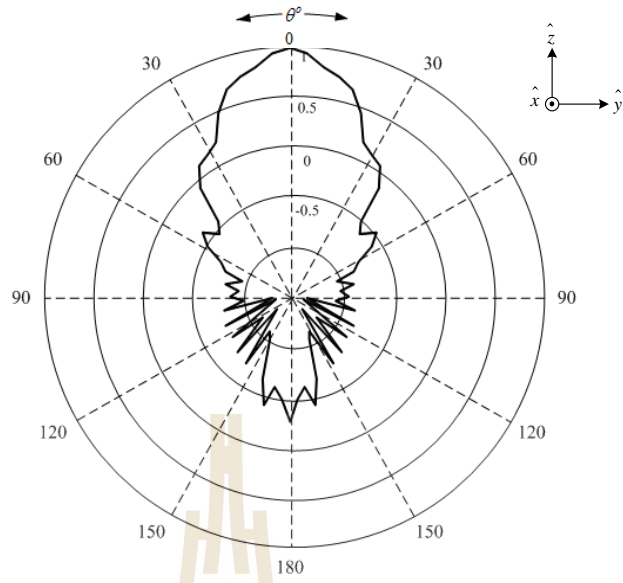
ในรูปที่ 4.23 แสดงรูปแบบสายอากาศและค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่ได้ทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่ให้ค่าประสิทธิภาพของสายอากาศที่นำเสนอดีที่สุดโดยค่าพารามิเตอร์ที่ได้คือ ความยาวสายอากาศปากแตรรูปกรวย (L_2) = 60 mm ระยะห่างระหว่างโครงสร้าง EBG กับปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศ (S_2) = 30 mm จากการจำลองการออกแบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST พบว่า



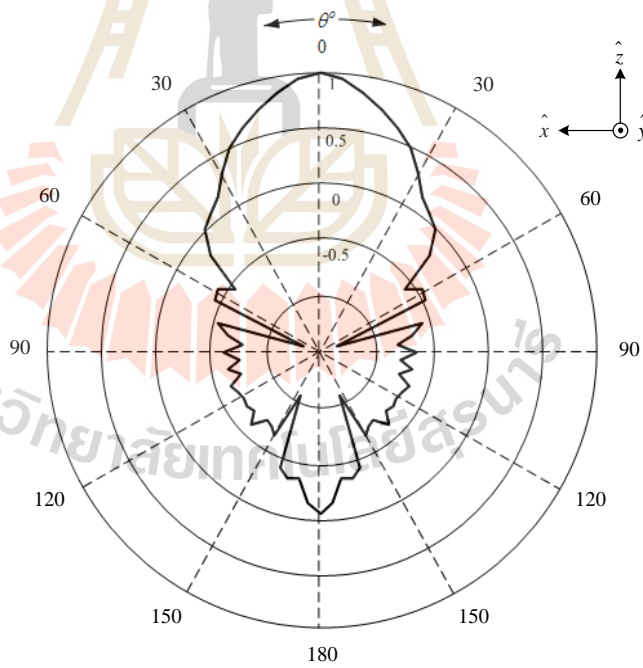
รูปที่ 4.23 โครงสร้างของสายอากาศปากแตรรูปกรวยที่ทำการลดขนาดความยาวของสายอากาศกรณีต่อทำงานร่วมกับโครงสร้าง EBG ที่นำเสนอ



รูปที่ 4.24 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับสายอากาศปากแตรรูปกรวยที่ทำการลดขนาดความยาวของสายอากาศกรณีต่อทำงานร่วมกับโครงสร้าง EBG ที่นำเสนอ



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.25 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวยที่ทำการลดขนาดความยาวของสายอากาศกรณีต่อทำงานร่วมกับโครงสร้าง EBG ที่นำเสนอ

จากการพิจารณาการนำโครงสร้าง EBG แบบดอกเห็ดออกมาออกแบบทำงานร่วมกับสายอากาศปากแตรที่ทำการลดขนาดความยาวของสายอากาศมาตรฐานลงมาครึ่งหนึ่งของความยาวปกติพบว่าสามารถเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานเพียงเล็กน้อย จากตารางที่ 4.4 ได้ทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐานกับสายอากาศที่นำเสนอ จะเห็นได้ว่าขนาดความยาวของสายอากาศที่นำเสนอโดยรวมเท่ากับนั้นมีความยาวของสายอากาศน้อยกว่าสายอากาศขนาดมาตรฐานเท่ากับ 45 mm และอัตราขยายของสายอากาศที่นำเสนอมีใกล้เคียงกับสายอากาศขนาดมาตรฐานโดยมีค่าเท่ากับ 17.5 dB ซึ่งมีความมากกว่าสายอากาศขนาดมาตรฐานเพียง 0.2 dB จากการออกแบบการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติของวัสดุในรูปแบบโครงสร้างช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบดอกเห็ดนี้ พบว่าสามารถลดขนาดของสายอากาศปากแตรรูปกรวยลงได้แต่อัตราขยายของสายอากาศที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์สายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐานกับสายอากาศที่นำเสนอ

พารามิเตอร์	สายอากาศมาตรฐาน	สายอากาศที่นำเสนอ
ความยาวสายอากาศ	120 mm	90 mm
อัตราขยาย (Gain)	17.3 dBi	17.5 dBi
สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11})	-22.46 dB	-24.73 dB
ระดับพู่ข้างระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane SLL)	-25.8 dB	-23.3 dB
ระดับพู่ข้างระนาบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (H-Plane SLL)	-26.3 dB	-24.1 dB

จากการศึกษาวิเคราะห์ ออกแบบ และจำลองการทำงานการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติของวัสดุในรูปแบบโครงสร้างช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบดอกเห็ดนี้ พบว่าเทคนิคดังกล่าวที่ผู้วิจัยได้ตั้งสมมุติฐานไว้ว่าโครงสร้างโพรงช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้านั้นเมื่อนำมาประกอบร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยแล้วจะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศปากแตรได้สูงขึ้น เมื่อผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างโพรงช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้ามาติดตั้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศปากแตรนั้น โดยทำการปรับปรุงรูปแบบโครงสร้างในลักษณะต่างๆ รวมไปถึงตำแหน่งการวางโครงสร้างโพรงช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า จากผลการวิจัยพัฒนาพบว่าอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูป

กรวยเพิ่มขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อย โดยมีอัตราขยายเพิ่มขึ้นประมาณ 0.2 dBi แต่สามารถลดขนาดความยาวของสายอากาศปากแตรรูปกรวยลงมา โดยมีขนาดความยาวของสายอากาศปากแตรเหลือเพียง 90 มิลลิเมตร โดยลดลงจากเดิมประมาณ 30 มิลลิเมตรส่งผลให้สายอากาศปากแตรมีน้ำหนักเบาขึ้น จากผลการออกแบบและวิจัยสามารถสรุปผลการนำคุณสมบัติอภิวัดในรูปแบบโครงสร้างช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบดอกเห็ดมาออกรวมกับสายอากาศปากแตรนั้นสามารถทำการลดขนาดสายอากาศปากแตรจากเดิมโดยสายอากาศมีอัตราขยายเท่ากับสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐาน

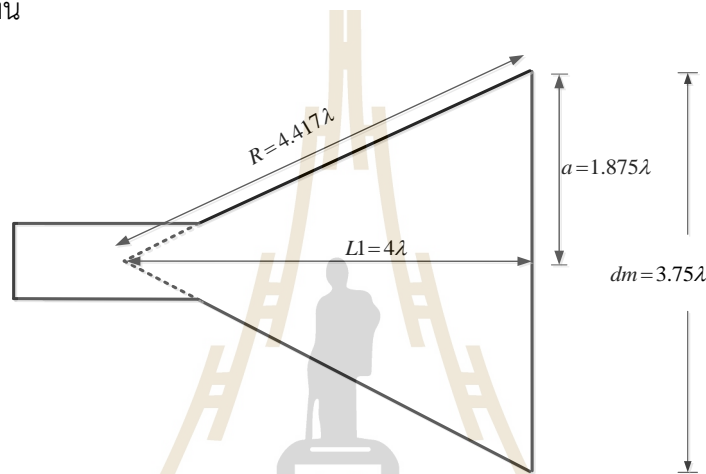
จากผลการออกแบบและพัฒนาสายอากาศปากแตรรูปกรวยนำเสนอพบว่าคุณสมบัติอภิวัดในรูปแบบโครงสร้างช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบดอกเห็ด สามารถลดขนาดของโครงสร้างของสายอากาศปากแตร แต่อัตราขยายของสายอากาศไม่เพิ่มขึ้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการรูปแบบโครงสร้างอภิวัดในรูปแบบอื่นๆ เพื่อให้ความเหมาะสมต่อนำมาออกแบบร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวย ในเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศโดยเฉพาะในส่วนของการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศจากเดิม จากการศึกษาพบว่า เทคโนโลยีอภิวัดในรูปแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด (wire medium structure) ถือเป็นอีกโครงสร้างหนึ่งที่มีคุณสมบัติที่ถือว่ามีความน่าสนใจต่อการนำมาพัฒนาในการเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศปากแตรรูปกรวย ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาและนำคุณสมบัติอภิวัดในรูปแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดมาออกแบบร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยเพื่อประสิทธิภาพของสายอากาศ โดยขั้นตอนในการออกแบบได้กล่าวไว้ในหัวข้อต่อไป

4.4 การปรับปรุงประสิทธิภาพแบบรูปการแผ่พลังงานโดยใช้โพลต์ไดอิเล็กตริก

โพลต์ไดอิเล็กตริก (Dielectric loaded) ถือได้ว่าเป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมในการนำมาใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศ โดยคุณสมบัติของโพลต์ไดอิเล็กตริกจะถูกนำมาใช้ในการเพิ่มอัตราขยายและปรับปรุงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคการใส่โพลต์ไดอิเล็กตริกเพื่อใช้ในการปรับปรุงแบบรูปการแผ่พลังงาน เนื่องจากการออกแบบสายอากาศปากแตรรูปกรวยในหัวข้อ 4.2 นั้นพบว่าแบบรูปการแผ่พลังงานที่ออกจากสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานไม่สมมาตรและระดับพูข้างสูง ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงจะได้อธิบายถึงเทคนิคการใส่โพลต์ไดอิเล็กตริกมาใช้ปรับปรุงประสิทธิภาพของแบบรูปการแผ่พลังงานและลดระดับพูข้างของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน โดยอธิบายถึงขั้นตอนการออกแบบและวิเคราะห์รูปแบบของโครงสร้างโพลต์ไดอิเล็กตริกและระยะตำแหน่งการจัดวางโพลต์ไดอิเล็กตริกภายในสายอากาศปากแตรรูปกรวยที่เหมาะสม

4.4.1 พิจารณาจุดศูนย์กลางเฟสสายอากาศปากแตรรูปกรวย (Phase Center)

ในการออกแบบการใส่โหลดไดโอดเล็กทรอนิกส์ภายในสายอากาศปากแตรรูปกรวยเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพแบบรูปการแผ่พลังงาน เริ่มทำการพิจารณาจุดศูนย์กลางเฟสของสายอากาศปากแตรรูปกรวยเพื่อใช้ในการพิจารณาค่าตำแหน่งการวางโหลดไดโอดเล็กทรอนิกส์ ในการพิจารณาค่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางเฟสนั้นได้กล่าวถึงทฤษฎีการคำนวณหาตำแหน่งจุดศูนย์กลางเฟสไว้ในบทที่ 3 จากรูปที่ 4.26 แสดงค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณจุดศูนย์กลางเฟส จากสมการ (3.30) ใช้สำหรับคำนวณหาค่าฟังก์ชัน S เพื่อใช้สำหรับคำนวณหาจุดกึ่งกลางเฟสของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยสามารถแสดงวิธีคำนวณได้ดังนี้



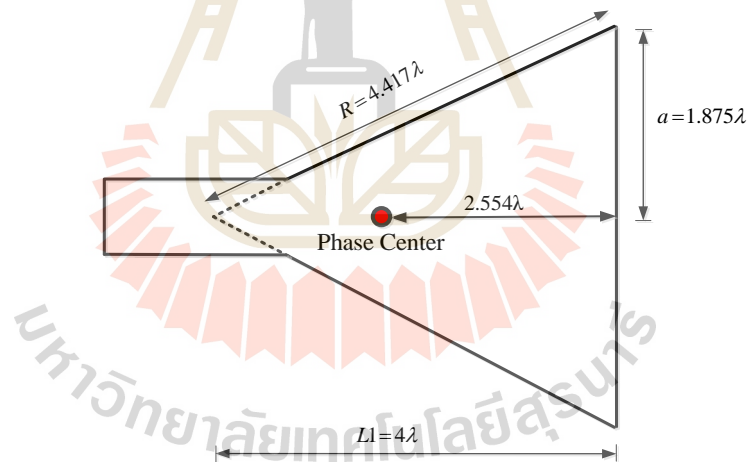
รูปที่ 4.26 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของโครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยมาตรฐาน สำหรับคำนวณจุดศูนย์กลางเฟส

$$\begin{aligned}
 S &= \frac{\Delta}{\lambda} \\
 &= \frac{a^2}{2\lambda R} \\
 (3.30) \quad &= \frac{(1.875\lambda)^2}{2\lambda(4.417\lambda)} \\
 S &= 0.397
 \end{aligned}$$

นำค่า S ที่ได้ไปเทียบในตารางที่ 3.1 เพื่อนำค่าที่ได้จากตารางไปทำการคำนวณจุดศูนย์กลางเฟสจากค่า S เท่ากับ 0.397 จะได้ค่า L_{ph}/R_n ของระนาบสนามแม่เหล็กเท่ากับ 0.471 และ L_{ph}/R_e ของระนาบสนามไฟฟ้าเท่ากับ 0.807 ดังนั้นจะได้ค่าจุดศูนย์กลางเฟสดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{จุดศูนย์กลางเฟสในระนาบสนามไฟฟ้า} &= 0.807R \\
 &= 0.807 \times 4.417\lambda \\
 &= 3.356\lambda \text{ หรือ } 10.693 \text{ เซนติเมตร} \\
 \\
 \text{จุดศูนย์กลางเฟสในระนาบสนามแม่เหล็ก} &= 0.446R \\
 &= 0.446 \times 4.417\lambda \\
 &= 1.753\lambda \text{ หรือ } 5.263 \text{ เซนติเมตร}
 \end{aligned}$$

จากการคำนวณจะได้ระยะค่าจุดศูนย์กลางเฟสที่ระนาบสนามไฟฟ้าเท่ากับ 3.356λ หรือ 10.693 เซนติเมตร และจุดศูนย์กลางเฟสที่ระนาบสนามแม่เหล็กเท่ากับ 1.753λ หรือ 5.263 เซนติเมตร จากทฤษฎีในการคำนวณหาค่าจุดศูนย์กลางเฟสเนื่องจากระยะจุดศูนย์กลางเฟสในระนาบสนามไฟฟ้ากับระนาบสนามแม่เหล็กมีระยะที่ต่างกันอย่างสิ้นเชิงจึงต้องนำระยะที่คำนวณได้จากทั้งสองระนาบมาทำการหาค่าระยะเฉลี่ย โดยจุดศูนย์กลางเฟสที่ได้เท่ากับ 2.554λ หรือ 7.625 เซนติเมตรดังแสดงในรูปที่ 4.27 ในการพิจารณาดำแหน่งเฉลี่ยในการวางโหนดไดโอดีเล็กตริก



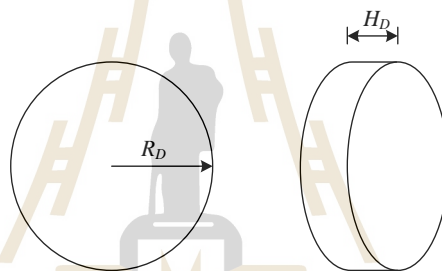
รูปที่ 4.27 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางเฟสสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน

4.4.2 การออกแบบและวิเคราะห์รูปแบบโครงสร้างโหนดไดโอดีเล็กตริก

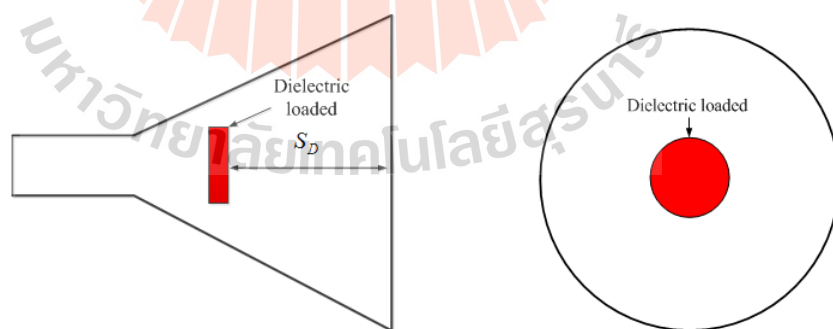
จากหัวข้อที่ผ่านมาได้ทำการคำนวณหาจุดศูนย์กลางเฟสเพื่อใช้ในการพิจารณากำหนดจุดในการวางโหนดไดโอดีเล็กตริก โดยขั้นตอนในการพิจารณาโครงสร้างโหนดไดโอดีเล็กตริกนั้นในการออกแบบรูปแบบโครงสร้างโหนดไดโอดีเล็กตริกนั้นจากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการพิจารณาดำแหน่งในการวางโหนดไดโอดีเล็กตริกนั้นได้ทำการจัดวางไว้ ณ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางเฟสดังนั้นในการพิจารณาดำแหน่งในการวางโหนดไดโอดีเล็กตริกในงานวิจัยนี้จึงทำการกำหนดตำแหน่งใน

การวาง โหลดไดอิเล็กทริกไว้ ณ จุดศูนย์กลางเฟสแล้วจึงทำการจำลองการออกแบบและวิเคราะห์รูปแบบของโหลดไดอิเล็กทริกที่เหมาะสมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานเพื่อปรับปรุงทำให้แบบรูปการแผ่พลังงานและลดระดับฟูซิง

ในขั้นตอนแรกได้ทำการเลือกวัสดุเพื่อใช้ในการออกแบบโหลดไดอิเล็กทริกโดยคำนึงถึงองค์ประกอบพื้นฐานคือ หาได้ง่ายตามท้องตลาด ราคาถูกและน้ำหนักเบา โดยในการพิจารณาการใส่โหลดไดอิเล็กทริกเข้าไปภายในสายอากาศปากแตรรูปกรวย โดยเลือกชนิดของไดอิเล็กทริกคือ ซุปเปอร์ลีน (Polyamide) ซึ่งมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity) เท่ากับ 3.5 และกำหนดโครงสร้างในการออกแบบเป็นรูปทรงกระบอกซึ่งมีรูปทรงที่สัมพันธ์กับโครงสร้างของสายอากาศปากแตรรูปกรวยดังแสดงในรูปที่ 4.28 และลักษณะการวางตำแหน่งของโหลดไดอิเล็กทริกดังแสดงในรูปที่ 4.29 โดยทำการกำหนดตำแหน่งในการวางโหลดไดอิเล็กทริกไว้ ณ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางเฟส



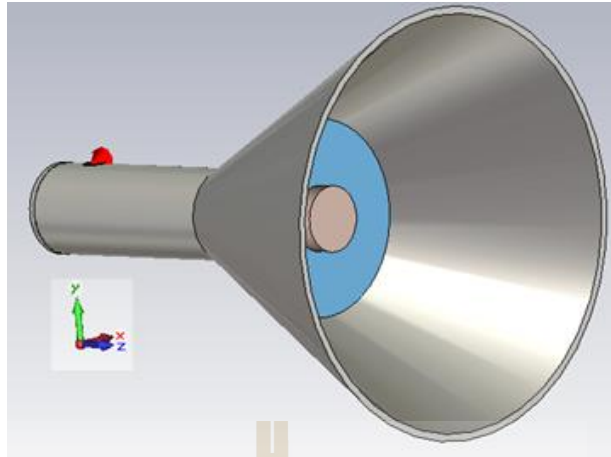
รูปที่ 4.28 โครงสร้างโหลดไดอิเล็กทริก



(ก) ภาพด้านข้าง

(ข) ภาพด้านบน

รูปที่ 4.29 การวางตำแหน่งโหลดไดอิเล็กทริกภายในสายอากาศปากแตรรูปกรวย

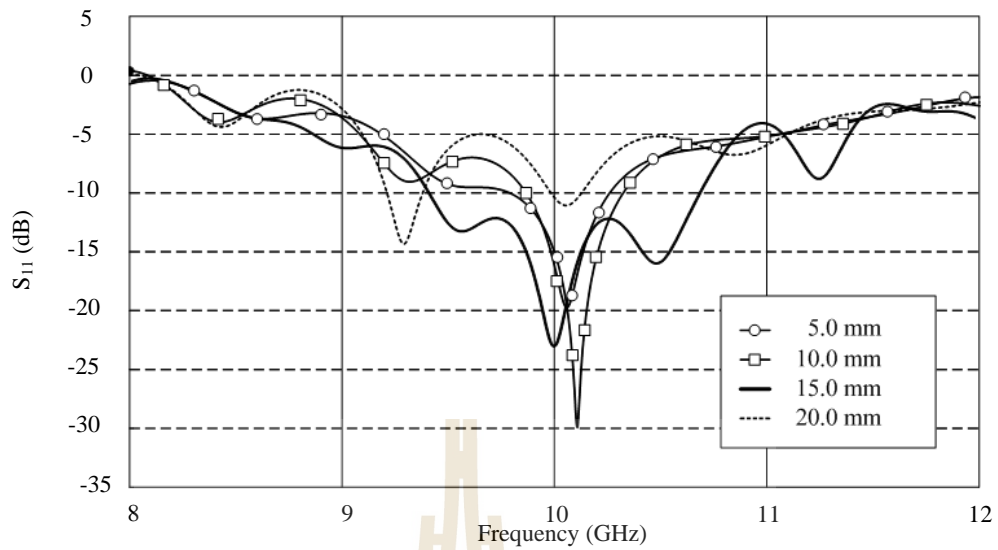


รูปที่ 4.30 โครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีใส่โพล्टไดอิเล็กตริกที่ทำการจำลองการออกแบบด้วยโปรแกรม CST

ในการออกแบบโพล्टไดอิเล็กตริกที่ทำการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST โดยในรูปที่ 4.30 แสดงรูปแบบโครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีใส่โพล्टไดอิเล็กตริกที่ทำการจำลองการออกแบบด้วยโปรแกรม CST เพื่อทำการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของโพล्टไดอิเล็กตริกโดยทำการพิจารณาจากหาค่ารัศมีโพล्टไดอิเล็กตริก (R_D) ความหนาของโพล्टไดอิเล็กตริกที่เหมาะสม (H_D) และระยะตำแหน่งการวางโพล्टไดอิเล็กตริก (S_D) ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่สมมาตรและระดับพูซังต่ำ

4.4.2.1 การพิจารณาขนาดรัศมีของโพล्टไดอิเล็กตริก

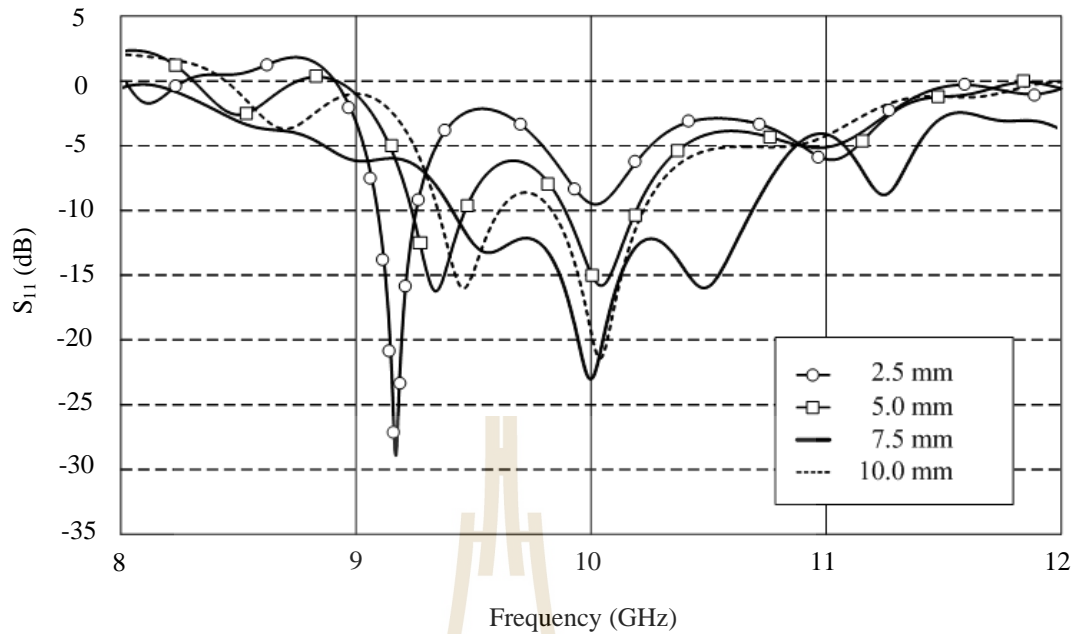
ในการพิจารณาขนาดรัศมีของโพล्टไดอิเล็กตริก (R_D) ได้ทำการกำหนดพารามิเตอร์คือความหนาของโพล्टไดอิเล็กตริก (H_D) เท่ากับ $\lambda/4$ และระยะตำแหน่งการวางโพล्टไดอิเล็กตริกอยู่ ณ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางเฟส (H_D) เท่ากับ 2.554λ จากนั้นทำการพิจารณารัศมีของโพล्टไดอิเล็กตริกจำนวน 4 ค่าได้แก่ 5 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งจากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST เมื่อทำการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ดังแสดงในรูปที่ 4.31 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจากการพิจารณาขนาดรัศมีของโพล्टไดอิเล็กตริกที่ใส่เข้าไปภายในสายอากาศปากแตรที่มีขนาดรัศมีของโพล्ट ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 15 มิลลิเมตร หรือ $\lambda/2$ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ตอบสนองกับความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่กลางของสายอากาศปากแตรที่ออกแบบคือ 10 GHz



รูปที่ 4.31 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของโหลดไดอิเล็กตริกที่รัศมี (R_D) ขนาดต่างๆ

4.4.2.2 การพิจารณาขนาดความหนาของโหลดไดอิเล็กตริก

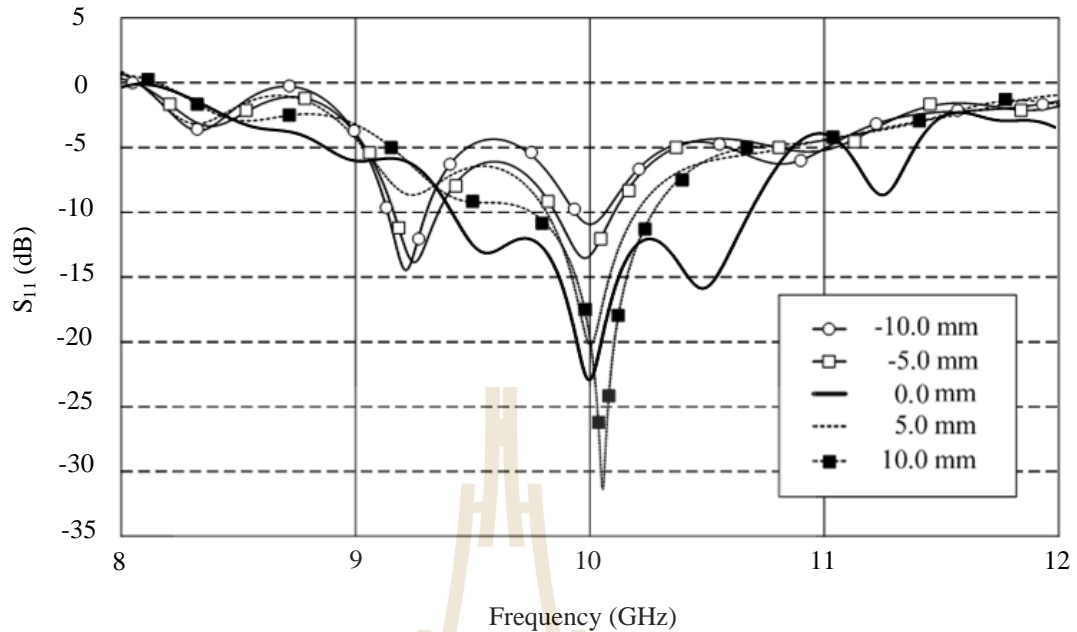
ในการพิจารณาขนาดความหนาของโหลดไดอิเล็กตริก (H_D) โดยทำการกำหนดพารามิเตอร์คือรัศมีของโหลดไดอิเล็กตริก (R_D) จากการพิจารณาในหัวข้อก่อนหน้ามีค่าเท่ากับ $\lambda/2$ และระยะตำแหน่งการวางโหลดไดอิเล็กตริกอยู่ ณ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางเฟส (S_D) เท่ากับ 2.554λ จากนั้นทำการพิจารณาขนาดความหนาของโหลดไดอิเล็กตริกจำนวน 4 ค่าคือ 2.5 มิลลิเมตร 5 มิลลิเมตร 7.5 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งจากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST เมื่อทำการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ดังแสดงในรูปที่ 4.32 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจากการพิจารณาขนาดรัศมีของโหลดไดอิเล็กตริกที่ใส่เข้าไปภายในสายอากาศปากแตรที่มีขนาดความหนาของโหลดไดอิเล็กตริกเท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร หรือ $\lambda/4$ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ตอบสนองกับความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่กลางของสายอากาศปากแตรที่ออกแบบคือ 10 GHz



รูปที่ 4.32 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของโหนดไดอิเล็กตริกที่ขนาดความหนา (H_D) ต่างๆ

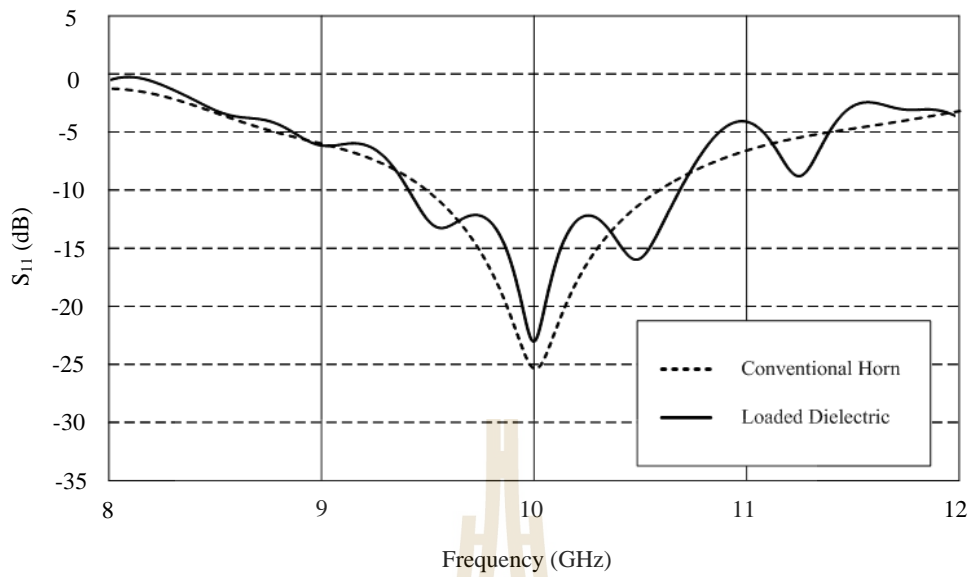
4.4.2.3 การพิจารณาตำแหน่งการวางโหนดไดอิเล็กตริก

จากขั้นตอนในการออกแบบและวิเคราะห์ตำแหน่งการวางโหนดไดอิเล็กตริกโดยทำการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นในการวาง ณ จุดศูนย์กลางเฟสของสายอากาศ ในขั้นตอนนี้จะทำการพิจารณาตำแหน่งของโหนดไดอิเล็กตริกที่ตำแหน่งระยะการวางโหนดไดอิเล็กตริก (S_D) โดยทำการกำหนดพารามิเตอร์คือรัศมีของโหนดไดอิเล็กตริก (R_D) จากการพิจารณาในหัวข้อก่อนหน้ามีค่าเท่ากับ $\lambda/2$ และความหนาของโหนดไดอิเล็กตริก (H_D) เท่ากับ $\lambda/4$ จากนั้นทำการพิจารณาระยะตำแหน่งของโหนดไดอิเล็กตริกโดยทำการพิจารณาตำแหน่งการวางโดยเลื่อนออกจากตำแหน่งจุดศูนย์กลางเฟสจำนวน 4 ค่าคือ -10 มิลลิเมตร -5 มิลลิเมตร 0 มิลลิเมตร 5 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งจากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST เมื่อทำการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ดังแสดงในรูปที่ 4.33 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ณ ที่ตำแหน่งของโหนดไดอิเล็กตริกอยู่ที่จุดศูนย์กลางเฟสทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ตอบสนองกับความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่กลางของสายอากาศปากแตรที่ออกแบบคือ 10 GHz

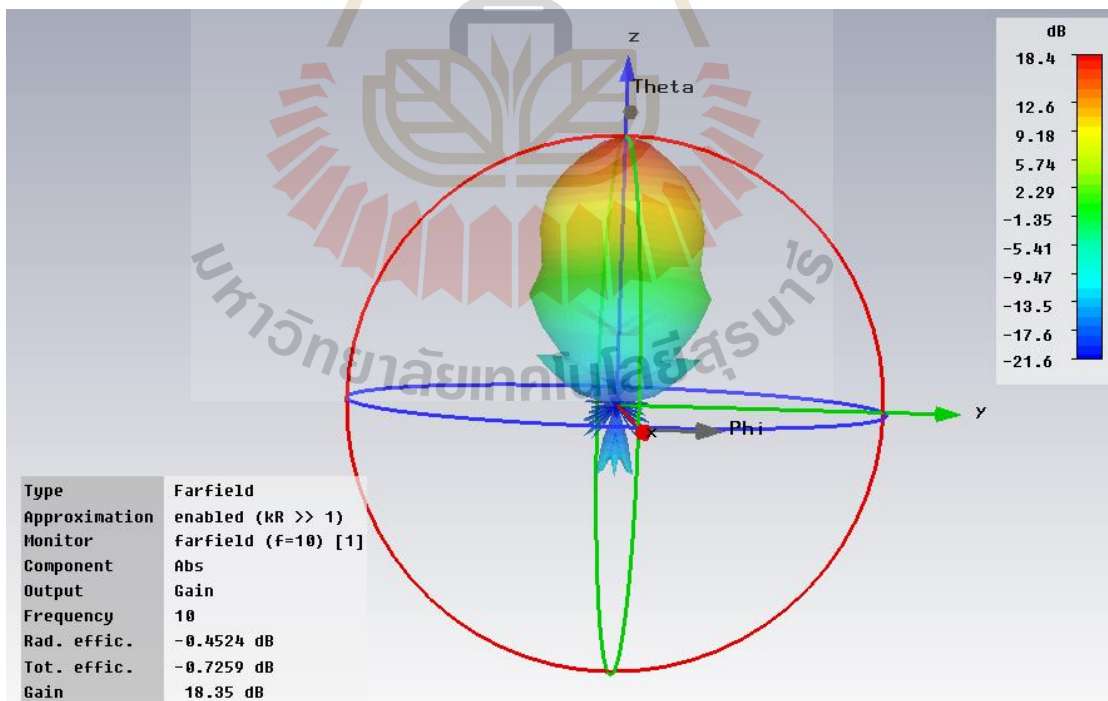


รูปที่ 4.33 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของโหลดไดอิเล็กตริกที่ตำแหน่ง ระยะการวางโหลดไดอิเล็กตริก (S_{11}) ห่างจากจุดศูนย์กลางเฟส

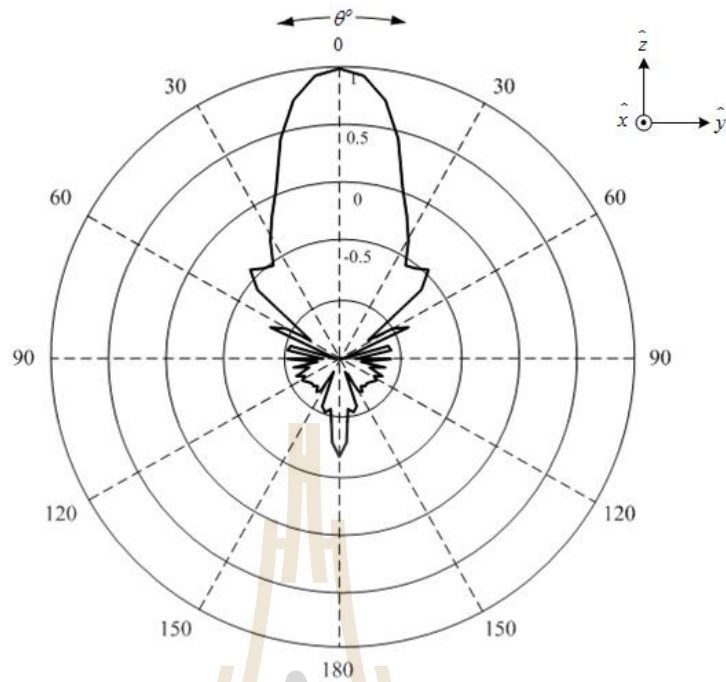
จากการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของเทคนิคการใส่โหลดไดอิเล็กตริกภายใน สายอากาศปากแตรรูปกรวย จากรูปที่ 4.34 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของ สายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานในกรณี ที่ใส่โหลดไดอิเล็กตริกเข้าไปภายในสายอากาศ พบว่าเมื่อทำการใส่โหลดไดอิเล็กตริกเข้าไปภายใน สายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมแล้วพบว่าค่า สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ (10 GHz) ของสายอากาศทั้งสอง แบบใกล้เคียงกัน และเมื่อทำการพิจารณาในส่วนของความกว้างแถบความถี่ที่ $S_{11} \leq -10$ dB สายอากาศพบว่ามีความกว้างแถบความถี่ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยที่ทำการใส่โหลดไดอิเล็กตริกเข้าไปภายในจะมีขนาดที่แคบลง เนื่องจากการใส่โหลดไดอิเล็กตริกเข้าไปภายในสายอากาศ ปากแตรซึ่งถูกออกแบบไว้ที่ความถี่กลางที่ 10 GHz จึงทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ได้ดีที่ความถี่กลางแต่ ยังมีการสะท้อนกลับของพลังงานในสายอากาศปากแตร นอกจากนี้พบว่าในส่วนของความถี่ที่ ใกล้เคียงความถี่กลางทั้งด้านความถี่ที่ต่ำกว่าและสูงกว่าความถี่กลางจะมีการสะท้อนกลับพลังงาน ค่อนข้างมากเนื่องจากโครงสร้างของโหลดไดอิเล็กตริกนั้นเรโซแนนซ์ได้ดี ณ ที่ความถี่กลางเท่านั้น



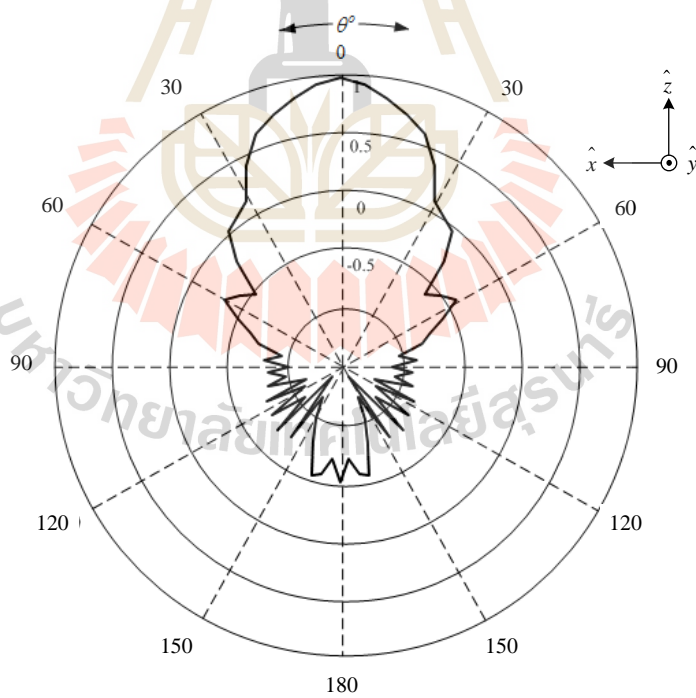
รูปที่ 4.34 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานในกรณีที่ใช้ของไหลไดอิเล็กตริกเข้าไปภายในสายอากาศ



รูปที่ 4.35 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานด้วยโปรแกรม CST ในรูปแบบ 3 มิติของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานกรณีใส่ไหลไดอิเล็กตริก



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.36 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาด
มาตรฐานกรณีใส่โหลดไดโอดีเล็กตริก

จากรูปที่ 4.35 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบ 3 มิติของสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีใส่โพลต์ไดอิเล็กตริก ที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST และในรูปที่ 4.36 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานหรือ normalized แล้ว ที่ความถี่ปฏิบัติการ 10 GHz พบว่าแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรที่ได้จำลองการออกแบบมีค่าอัตราขยายเท่ากับ 18.4 dB โดยมีอัตราขยายเพิ่มขึ้นจากเดิมอีกประมาณ 0.7 dB และจากแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane) พบว่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (half-power beamwidth: HPBW) ที่ได้จากทั้ง 2 ระนาบมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่เกิดขึ้นสมมาตรกัน อีกทั้งแบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้มีขนาดของพู่ข้างในระนาบสนามไฟฟ้ากับระนาบสนามแม่เหล็กลดลงจากเดิม ดังแสดงในตารางที่ 4.5

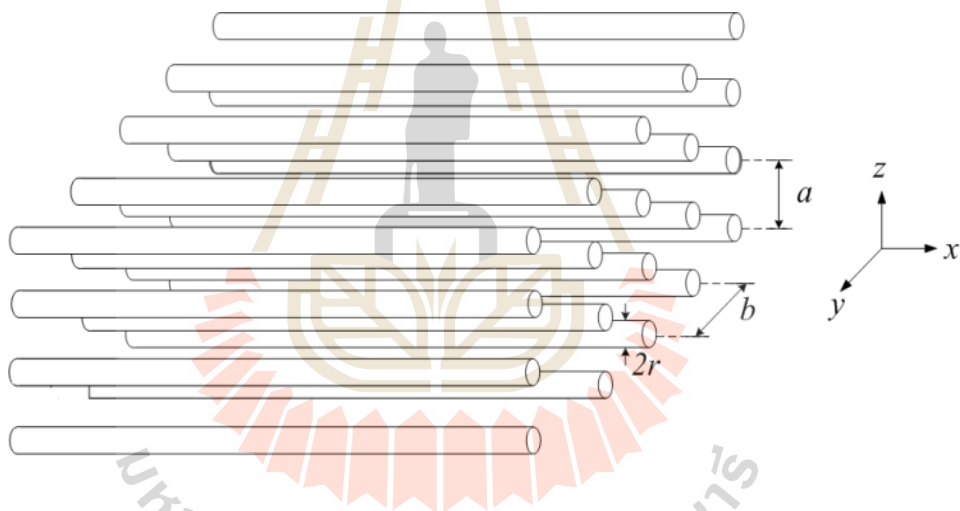
ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ระหว่างสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐานกับสายอากาศปากแตรกรณีใส่โพลต์ไดอิเล็กตริก

ชนิด	อัตราขยาย [dB]	ระดับพู่ข้าง [dB]	
		ระนาบสนามไฟฟ้า	ระนาบสนามแม่เหล็ก
สายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน	17.7	-29.4	-22.7
สายอากาศปากแตรรูปกรวยเมื่อทำการใส่โพลต์ไดอิเล็กตริก	18.4	-24.5	-25.9

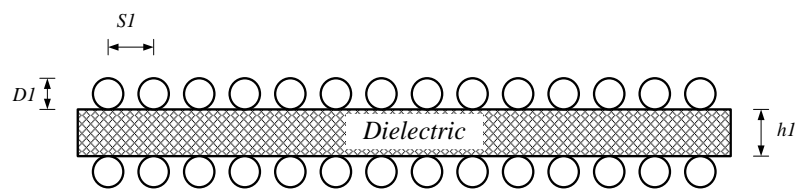
จากตารางที่ 4.5 แสดงผลสรุปค่าพารามิเตอร์ต่างที่ได้จากการออกแบบและวิเคราะห์ผลโดยทำการเปรียบเทียบระหว่างสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยเมื่อทำการใส่โพลต์ไดอิเล็กตริก พบว่าเมื่อทำการใส่โพลต์ไดอิเล็กตริกเข้าไปภายในสายอากาศปากแตรรูปกรวยอัตราขยายเพิ่มขึ้นเท่ากับ 18.4 dB โดยเพิ่มขึ้นจากเดิม 0.7 dB นอกจากนี้ขนาดของความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังมีขนาดที่สมมาตรขึ้น โดยขนาดความกว้างลำคลื่นกำลังในระนาบสนามไฟฟ้าเท่ากับ 17.6° และระนาบสนามแม่เหล็กเท่ากับ 17.9° และในส่วนองระดับพู่ข้างของสายอากาศพบว่าระดับพู่ข้างของสายอากาศปากแตรรูปกรวยเมื่อทำการใส่โพลต์ไดอิเล็กตริกเข้าไปภายในสายอากาศระดับพู่ข้างลดลงจากเดิม โดยขนาดของพู่ข้างของสายอากาศเมื่อทำการใส่โพลต์ไดอิเล็กตริกพบว่าระดับพู่ข้างของระนาบสนามไฟฟ้ากับระนาบสนามแม่เหล็กมีระดับที่ใกล้เคียงกันโดยระนาบสนามไฟฟ้ามีระดับพู่ข้างเท่ากับ -24.5 dB และระนาบสนามแม่เหล็กระดับพู่ข้างเท่ากับ -25.9 dB

4.5 การออกแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด

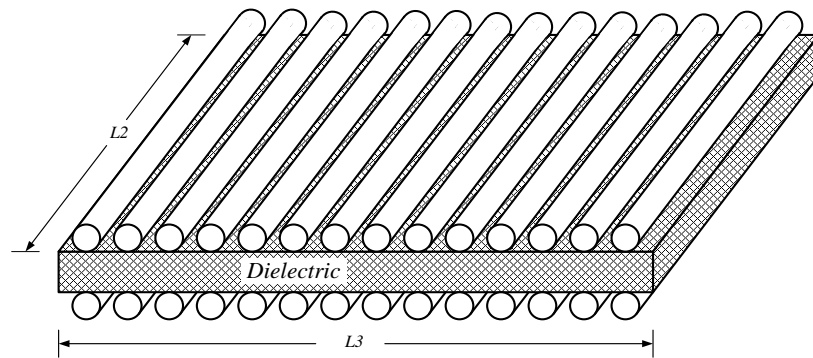
จากการศึกษาทฤษฎีและหลักการออกแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 แล้ว ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดเพื่อให้มีรูปแบบโครงสร้างที่เหมาะสมและมีคุณสมบัติในการทำงานร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแบบรูปการแผ่พลังงาน โดยวัตถุประสงค์ในการออกแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดนั้นเน้นให้โครงสร้างที่ได้มีขนาดกะทัดรัดและเป้าหมายในการออกแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดให้วางอยู่ในแนวระนาบปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตรหรือวางห่างจากปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตรให้ระยะน้อยที่สุด เพื่อให้ได้โครงสร้างของสายอากาศปากแตรที่พัฒนาขึ้นมีรูปทรงใกล้เคียงกับสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐาน



รูปที่ 4.37 โครงสร้างพื้นฐานตัวกลางแบบเส้นลวด

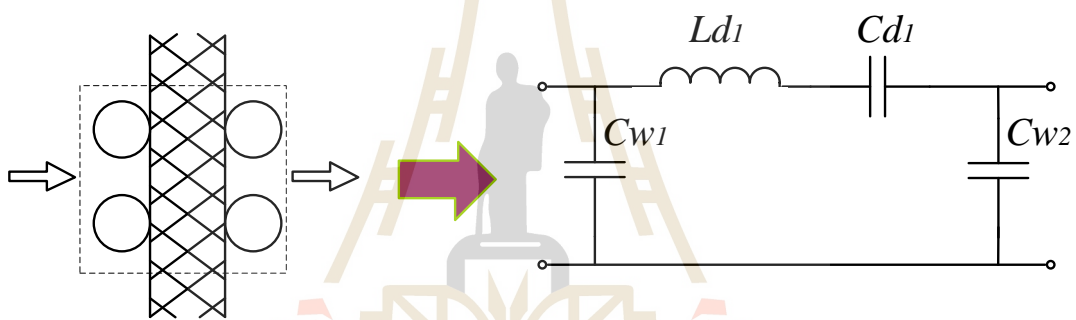


(ก) ด้านข้าง



(ข) โครงสร้างทั้งหมด

รูปที่ 4.38 โครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่ทำการออกแบบ



รูปที่ 4.39 วงจรเรโซแนนซ์ที่เกิดจากโครงสร้างสื่อตัวกลางแบบเส้นลวด

จากโครงสร้างของตัวกลางแบบเส้นลวดจะประกอบด้วยกรวางเรียงเส้นลวดขนาดเล็กวางในแนวระนาบขนานกันแล้ววางซ้อนกันเป็นชั้น ๆ ที่ระยะห่างระหว่างชั้นเท่า ๆ กันดังแสดงในรูปที่ 4.37 ในการออกแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดโดยทำการออกแบบที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่กลาง (center frequency) $f_0 = 10$ GHz จากทฤษฎีได้กล่าวถึงขนาดของเส้นลวดที่เลือกใช้ในการออกแบบตัวกลางต้องมีขนาดรัศมีของเส้นลวดน้อยกว่าความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้ในการออกแบบมากๆ ($r \ll \lambda$) อีกทั้งระยะห่างระหว่างการวางเรียงกันของเส้นลวด (b) และระยะห่างระหว่างชั้น (c) จะต้องมีขนาดน้อยกว่าความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้ในการออกแบบมากๆ เช่นกัน ดังนั้นในการเลือกขนาดของเส้นลวดได้ทำการเลือกขนาดรัศมีของเส้นลวด (r) เท่ากับ 0.75 มิลลิเมตรในการออกแบบตัวกลางแบบเส้นลวด ระยะห่างระหว่างเส้นลวดที่วางเรียงขนานกัน (b) เท่ากับ 3.5 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างชั้น (c) เท่ากับ 3.5 มิลลิเมตร และจำนวนชั้นของเส้นลวด

(n) = 2 โดยช่องว่างระหว่างชั้นของเส้นลวดได้ออกแบบโดยไดอิเล็กตริก ชนิดซูเปอร์สโตนซึ่งมีค่า $\epsilon_r = 3.5$ เป็นค่าเริ่มต้นในการพิจารณาออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.38 จากโครงสร้างสื่อตัวกลางแบบเส้นลวดสามารถแสดงวงจรสมมูลย์ของโครงสร้างที่ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ผ่านโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 4.39 เนื่องจากโครงสร้างสื่อตัวกลางแบบเส้นลวดนั้นมีคุณสมบัติของอภิวัดคือมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นในขั้นตอนการออกแบบจึงต้องมีการพิจารณาโครงสร้างโดยทำการคำนวณเพื่อหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของสื่อตัวกลางแบบเส้นลวด (ϵ_{WM}) เพื่อพิสูจน์ว่าโครงสร้างที่ทำการออกแบบนั้นมีคุณสมบัติอภิวัดหรือค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเข้าใกล้ศูนย์ โดยใช้สมการ (3.32)

$$\epsilon_{WM} = \epsilon_0 \epsilon_{rh} \left(1 - \frac{k_p^2}{\epsilon_{rh} k_0^2 - k_y^2} \right)$$

จากสมการ (3.35)

$$\begin{aligned} k_p^2 &= \frac{2\pi}{a^2 (\ln(a/2\pi r) + 0.5275)} \\ k_p^2 &= \frac{2\pi}{(3.5\text{mm})^2 [\ln(3.5/2\pi \times 0.75) + 0.5275]} \\ &= 33.194 \end{aligned}$$

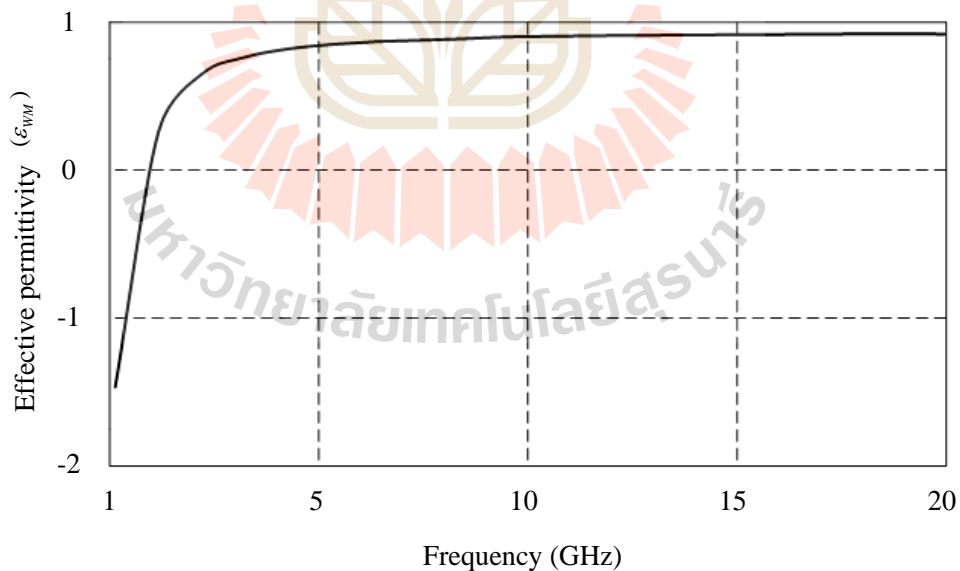
หาค่า k_0^2

$$\begin{aligned} k_0^2 &= \left(\frac{k}{\sqrt{\epsilon_h}} \right)^2 \\ &= \left(\frac{\omega}{c \cdot \epsilon_h} \right)^2 \\ &= \left(\frac{2\pi \times 10 \times 10^9}{3 \times 10^8 \times 3.5} \right)^2 \\ k_0^2 &= 3.580 \times 10^3 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}\epsilon_{WM} &= \epsilon_0 \epsilon_{rh} \left(1 - \frac{k_p^2}{\epsilon_{rh} k_0^2 - k_y^2} \right) \\ &= 3.5 \times \left(1 - \frac{33.194}{3.5 \times (3.580)^2} \right) \\ \epsilon_{WM} &= 0.79\end{aligned}$$

จากการคำนวณพบว่าที่ความถี่ 10 GHz ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดมีค่าเท่ากับ 0.79 ($\epsilon_{WM} = 0.79$) และในรูปที่ 4.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ (3.32) ที่ความถี่ตั้งแต่ 1 GHz – 20 GHz จากกราฟพบว่าจากโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่นำเสนอมีคุณสมบัติทำให้เกิดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเข้าใกล้ศูนย์และที่ความถี่ต่ำกว่า 1.5 GHz ทำให้เกิดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้ามีค่าติดลบซึ่งก็เป็นอีกหนึ่งคุณสมบัติของอภิวัด

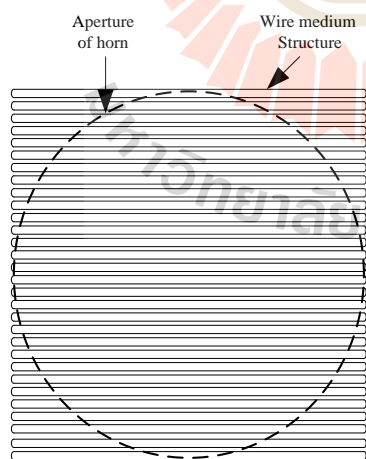


รูปที่ 4.40 กราฟแสดงค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่ความถี่ต่าง ๆ

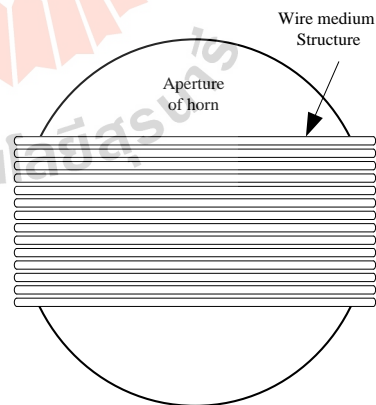
4.6 การพิจารณาโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดสำหรับทำงานร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดและตำแหน่งการวางที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศปากแตรรูปกรวย โดยในการออกแบบเริ่มจากการพิจารณารูปแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่เหมาะสมโดยทำการกำหนดรูปแบบโครงสร้างของตัวกลางแบบเส้นลวดอยู่ 4 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.41 ซึ่งโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดนั้นได้กำหนดการรูปแบบจัดเรียงเส้นลวดของตัวกลางแบบเส้นลวดในทิศทางแนวนอนตัดขวางทิศทางสนามแม่ไฟฟ้าที่แผ่พลังงานเพียงเท่านั้น เนื่องด้วยการจัดเรียงเส้นลวดในแนวตั้งซึ่งเป็นแนวเดียวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่พลังงานออกจากท่อนำคลื่นอีกทั้งระยะห่างระหว่างเส้นลวดมีระยะน้อยกว่าความยาวคลื่นมากๆ จะทำให้คลื่นไม่สามารถแผ่พลังงานผ่านโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดได้ โดยในการพิจารณารูปแบบการจัดเรียงและวางโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดทั้ง 4 รูปแบบ โดยในรูปแบบ A ทำการออกแบบให้มีโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดปิดครอบปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศ เพื่อพิจารณาว่าเมื่อคลื่นเดิมทางมายังโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดจะเกิดผลกระทบต่อความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ ในรูปแบบ B ทำการออกแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดโดยยังคงรูปแบบของโครงสร้างแบบ A แต่ทำการลดจำนวนของเส้นลวดที่ทำการจัดเรียงลง เพื่อพิจารณาโครงสร้างดังกล่าวนี้มีผลกระทบต่อความถี่เรโซแนนซ์ความถี่ในระนาบสนามไฟฟ้า ในส่วนในรูปแบบ C ทำพิจารณาโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดโดยทำการลดขนาดความกว้างของตัวกลางแบบเส้นลวดลงแต่ยังคงวางเรียงแนวเส้นลวดเต็มปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตร เพื่อพิจารณาว่าเมื่อลดขนาดความกว้างของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดลงจะมีผลกระทบต่อความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศและในรูปแบบสุดท้ายคือ รูปแบบ D ทำการลดขนาดความกว้างและการจัดเรียงเส้นลวดโดยมีขนาดเล็กกว่าปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศโดยออกแบบให้วาง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศแล้วทำการพิจารณาผลกระทบของโครงสร้างที่เกิดขึ้นต่อความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งในการจัดวางรูปแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดทั้ง 4 รูปแบบเพื่อพิจารณาผลกระทบต่อโครงสร้างที่เกิดขึ้นต่อความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศปากแตรรูปกรวย โดยทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดซึ่งประกอบด้วยขนาดรัศมีของเส้นลวด (r) เท่ากับ 0.75 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างเส้นลวดที่วางเรียงขนานกัน (b) เท่ากับ 3.5 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างชั้น (a) เท่ากับ 3.5 มิลลิเมตร และจำนวนชั้นของเส้นลวด (n) = 2 โดยช่องว่างระหว่างชั้นของเส้นลวดได้ออกแบบโดยไดอิเล็กตริกชนิดซูเปอร์สโตนซึ่งมีค่า $\epsilon_r = 3.5$ และกำหนดตำแหน่งเริ่มในการพิจารณาการวางโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดไว้ที่แนวระนาบปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตรรูปกรวย

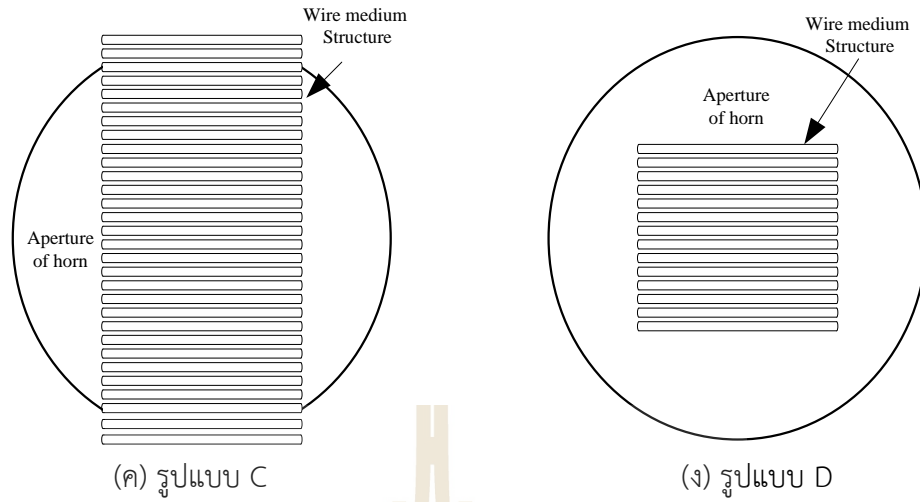
จากการพิจารณารูปแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดสำหรับทำงานร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยที่ได้วิเคราะห์รูปแบบโครงสร้างในการวางในแนวระนาบอะเพอร์เจอร์สายอากาศทั้ง 4 รูปแบบ จากการจำลองวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของรูปแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดทั้ง 4 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.41 นั้น เมื่อทำการพิจารณาความกว้างแถบความถี่ที่ $S_{11} \leq -10$ dB พบว่าทั้ง 4 รูปแบบมีขนาดความกว้างแถบความถี่ที่ใกล้เคียงกัน จากรูปเห็นได้ว่าในรูปแบบ A และ B ที่ความถี่ต่ำกว่าและสูงกว่าเรโซแนนซ์นั้นมีการสะท้อนกลับของคลื่นเกิดขึ้นซึ่งเป็นผลที่เกิดจากโครงสร้างของตัวกลางแบบเส้นลวด โดยทั้งสองรูปแบบมีขนาดความยาวของเส้นลวดที่จัดเรียงเท่ากับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศ ส่วนในรูปแบบ C และ D พบว่าไม่เกิดการสะท้อนกลับในตัวโครงสร้างเนื่องจากขนาดความยาวของเส้นลวดที่จัดเรียงมีขนาดสั้นกว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตร โดยแสดงให้เห็นได้ว่าขนาดความยาวของเส้นลวดที่ทำการจัดเรียงเป็นโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดนั้นเมื่อมีความยาวที่เหมาะสมโดยที่มีขนาดน้อยกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศจะทำให้เกิดการสะท้อนกลับของคลื่นน้อย จากรูปที่ 4.42 พบว่ารูปแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดในรูปแบบ D นั้นมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ณ ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศเท่ากับ 10 GHz ส่วนในรูปแบบ A, B, และ C มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศและเมื่อพิจารณาโครงสร้างรูปแบบ C จะเห็นได้ว่าการเรโซแนนซ์ที่ต่ำกว่ารูปแบบ D แต่เรโซแนนซ์ความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่กลาง (10 GHz) เล็กน้อย



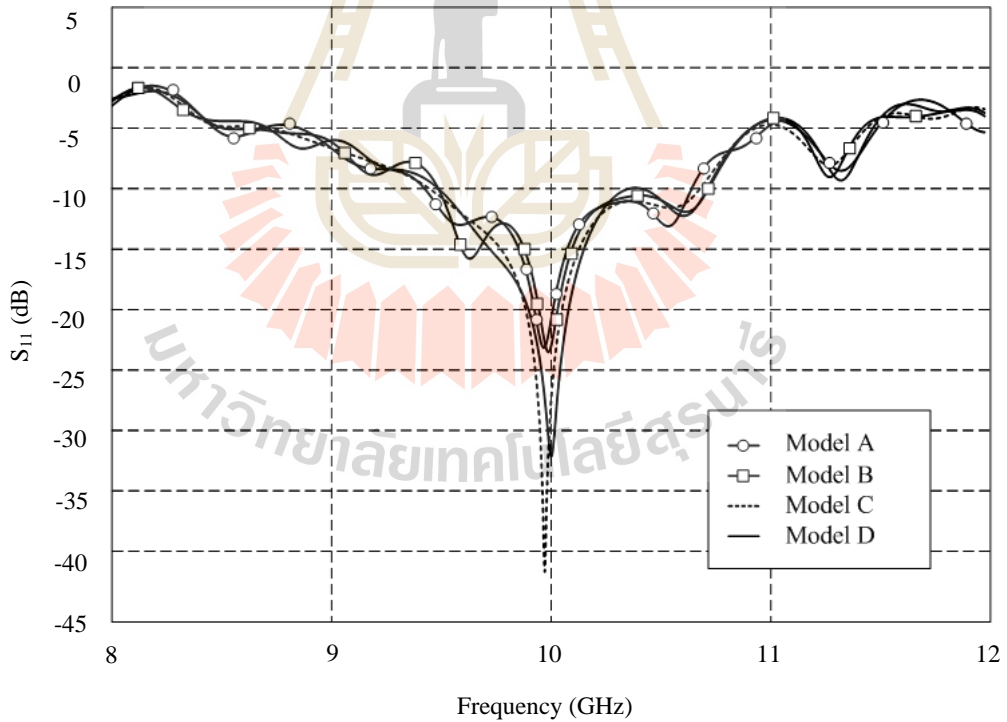
(ก) รูปแบบ A



(ข) รูปแบบ B

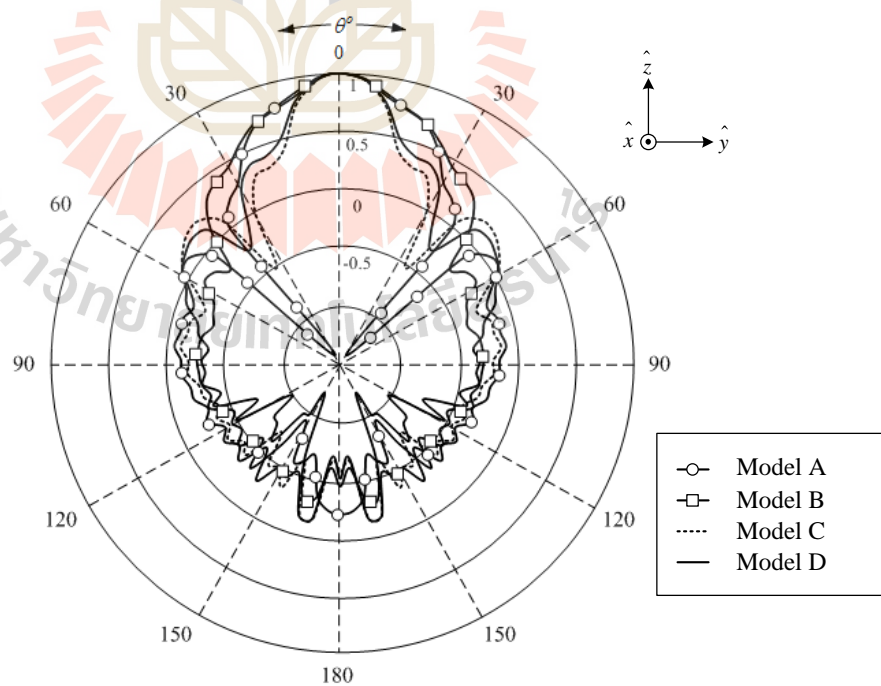


รูปที่ 4.41 รูปแบบการพิจารณาโครงสร้างของตัวกลางแบบเส้นลวดสำหรับทำงานร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวย

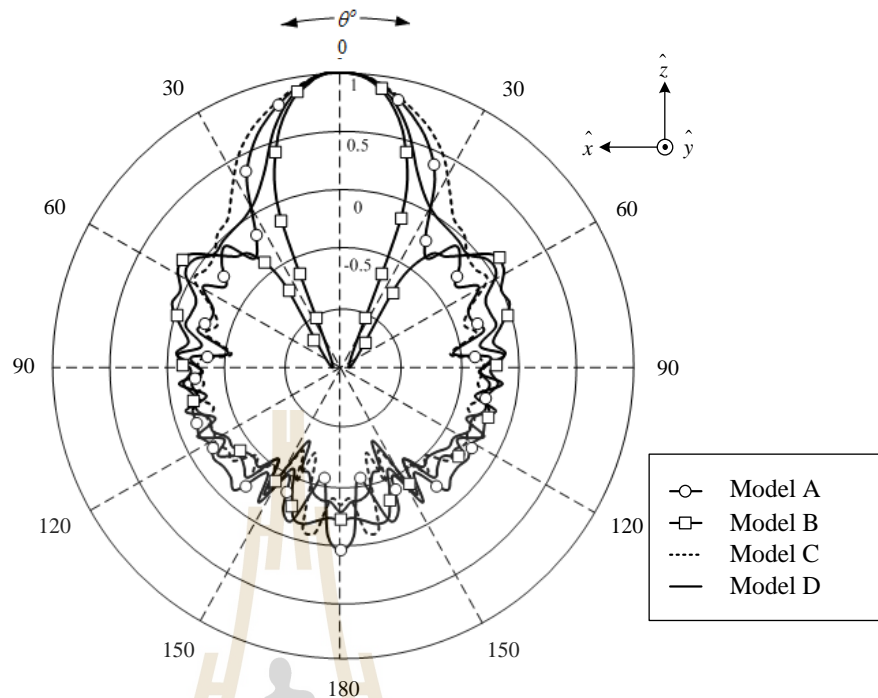


รูปที่ 4.42 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของรูปแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดสำหรับทำงานร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวย

เมื่อทำการพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานโดยการเปรียบเทียบรูปแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดทั้ง 4 รูปแบบ พบว่ารูปแบบ D นั้นมีแบบรูปการแผ่พลังงานทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กดีที่สุดในอีกทั้งยังมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางและอัตราขยายที่สูงกว่า นอกจากนั้นค่าระดับพู่ซางที่เกิดขึ้นต่ำเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดทั้ง 4 รูปแบบที่ได้ทำการนำเสนอตั้งแสดงในรูปที่ 4.43 และจากรูปที่ 4.44 แสดงการเปรียบเทียบอัตราขยายของรูปแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดทำงานร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยในแนวระนาบปากอะเพอร์เจอร์ จากการพิจารณาโครงสร้างทั้งที่ 4 รูปแบบที่ทำการนำเสนอพบว่าเป็นรูปแบบโครงสร้าง D มีอัตราขยายของสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์สูงที่สุดคือมีอัตราขยายเท่ากับ 20.9 dB และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับสายอากาศปากแตรมาตรฐานนั้นพบว่ามีอัตราขยายเพิ่มขึ้น 3.2 dB จากการพิจารณารูปแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดทั้ง 4 รูปแบบที่นำเสนอพบว่าเป็นรูปแบบโครงสร้าง D นั้นเป็นรูปแบบที่มีความเหมาะสมต่อการทำงานร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวย อีกทั้งยังมีขนาดของโครงสร้างที่กะทัดรัดเมื่อทำการติดตั้งเพิ่มเติมเข้าไปไม่ทำให้โครงสร้างของสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐานเปลี่ยนแปลงจากเดิม เนื่องจากในการเพิ่มโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐานเพียงแต่ทำการวางตัวกลางแบบเส้นลวดวางบนแนวระนาบปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตรรูปกรวย

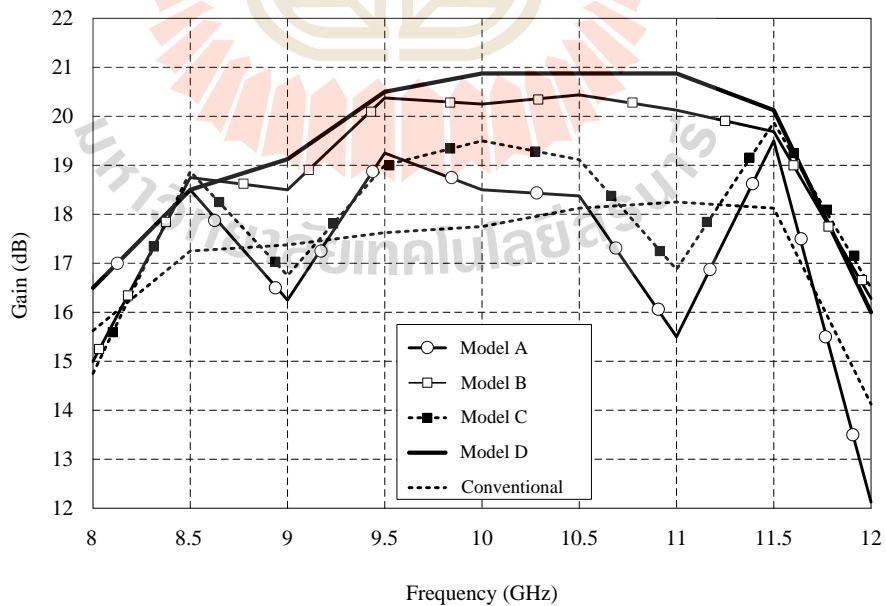


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

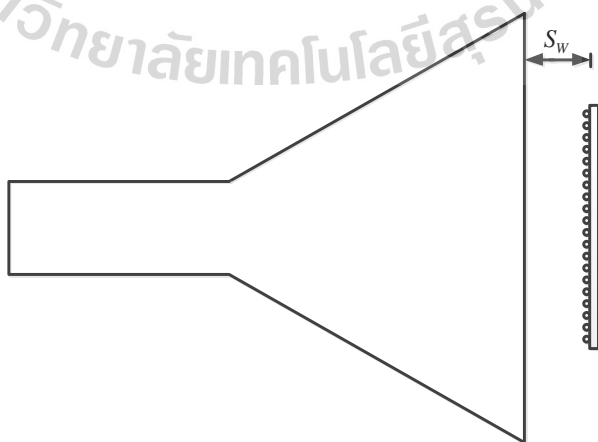
รูปที่ 4.43 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดเมื่อติดตั้งร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวย



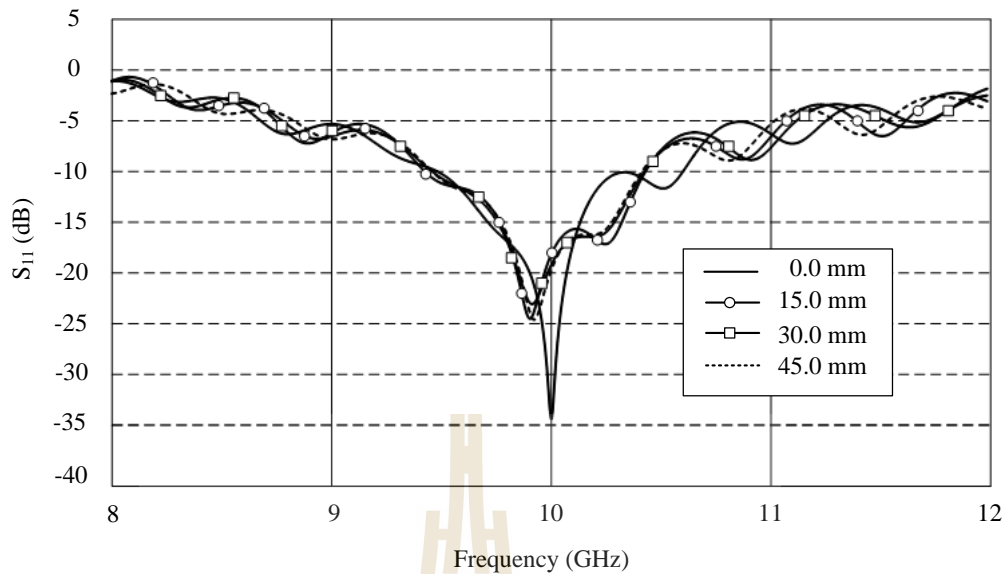
รูปที่ 4.44 การเปรียบเทียบผลการจำลองอัตราขยายของรูปแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดเมื่อทำการติดตั้งร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวย

4.6.1 การพิจารณาดำเน่่งการระยะวางโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่ตำแหน่งปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตร

จากการออกแบบและกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวกลางแบบเส้นลวดในหัวข้อที่ผ่านมา ในหัวข้อนี้จะทำการพิจารณาหาระยะตำแหน่งการวางโครงสร้างสื่อตัวกลางแบบเส้นลวดที่เหมาะสมต่อการทำงานร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวย โดยจะทำการพิจารณาดำเน่่งการวางโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่ห่างจากปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตร (S_w) ดังแสดงในรูปที่ 4.45 โดยการพิจารณาระยะตำแหน่งการวางโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดห่างจากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศจำนวน 4 ระยะ คือ 0, 15, 30, และ 45 มิลลิเมตร ซึ่งจากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของระยะตำแหน่งในการพิจารณาทั้ง 4 ระยะ ดังแสดงในรูปที่ 4.46 พบว่าที่ตำแหน่งการวางระยะห่างโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดกับระนาบอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศที่ระยะเท่ากับ 0 มิลลิเมตร หรือที่ตำแหน่งแนวเดียวกับระนาบปากอะเพอร์เจอร์สายอากาศปากแตรรูปกรวยมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่กลาง (10 GHz) ของสายอากาศปากแตรที่ออกแบบ และเมื่อการเลื่อนตำแหน่งโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดออกจากปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตรที่ระยะต่างๆ โดยทำการพิจารณาที่ระยะ 15, 30, และ 45 มิลลิเมตร พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่ต่ำกว่าความถี่กลางของสายอากาศปากแตรที่ทำออกแบบ ดังนั้นจากการพิจารณาการเลื่อนตำแหน่งระยะการวางโครงสร้างสื่อตัวกลางแบบเส้นลวดที่ห่างจากปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตร จึงสรุปได้ว่าตำแหน่งระยะที่เหมาะสมสำหรับการวางโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดคือที่ตำแหน่งแนวระนาบปากอะเพอร์เจอร์ ($S_w = 0$ mm) ของสายอากาศปากแตรซึ่งทำให้สายอากาศปากแตรตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่กลาง



รูปที่ 4.45 รูปแบบการพิจารณาระยะ S_w



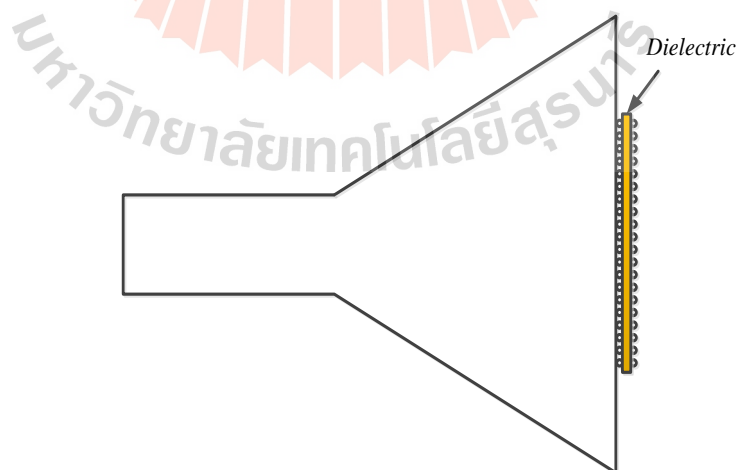
รูปที่ 4.46 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับระยะตำแหน่งการวางโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่ห่างจากปากอะเพอร์เจอร์สายอากาศปากแตรรูปกรวย

จากรูปที่ 4.46 เมื่อทำการพิจารณาในส่วนของความกว้างแถบความถี่ พบว่าที่ตำแหน่งระยะการวางโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่ห่างจากปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตรที่ระยะ 15, 30, และ 45 มิลลิเมตรจะมีความกว้างแถบความถี่ที่ใกล้เคียงกัน แต่ที่ระยะตำแหน่งการวางโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่แนวระนาบปากอะเพอร์เจอร์ ($S_w = 0$ mm) ความกว้างแถบความถี่จะแคบกว่าการวางโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดห่างจากปากอะเพอร์เจอร์ เนื่องจากเมื่อระยะตำแหน่งการวางโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดยิ่งวางห่างจากปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศการสะท้อนกลับภายในสายอากาศจะเกิดขึ้นน้อยลงจึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เมื่อวางโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด ณ ตำแหน่งปากอะเพอร์เจอร์มีความกว้างแถบความถี่ที่แคบกว่าระยะอื่นๆที่ทำการพิจารณา

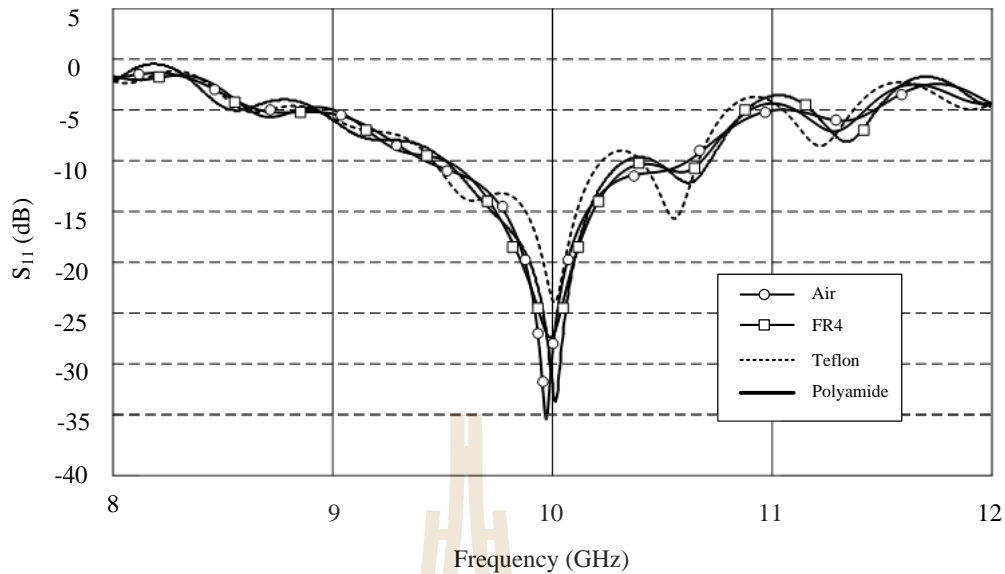
4.6.2 การพิจารณาชนิดไดอิเล็กตริกที่วางกั้นระหว่างชั้นของแนวระนาบเส้นลวดของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด

จากการพิจารณาระยะตำแหน่งการวางโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่ปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศในหัวข้อที่ผ่านมา ทำให้ได้ระยะตำแหน่งที่เหมาะสมในการวางโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดคือตำแหน่งกึ่งกลางบนแนวระนาบปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตรรูปกรวย ในหัวข้อนี้จะทำวิเคราะห์ชนิดของไดอิเล็กตริกที่วางระหว่างแนวระนาบของเส้นลวดบนโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดดังแสดงในรูปที่ 4.47 โดยในการพิจารณาได้ทำการกำหนด

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดตามที่ได้ทำการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงสร้างแบบเส้นลวดจากหัวข้อที่ผ่านมา โดยในการพิจารณาชนิดไดอิเล็กตริกในหัวข้อนี้ได้ทำการเลือกไดอิเล็กตริกจำนวน 4 ชนิด คือ อากาศ ($\epsilon_r = 1$) ซุปเปอร์ลีน (Polyamide) ($\epsilon_r = 3.5$) เทฟลอน (Teflon) ($\epsilon_r = 2.1$) และ FR4 ($\epsilon_r = 4.5$) ซึ่งในการพิจารณาเลือกชนิดไดอิเล็กตริกในการออกแบบโดยคำนึงถึงชนิดของไดอิเล็กตริกนั้นสามารถหาได้ง่ายตามท้องตลาด น้ำหนักเบาและมีราคาถูก อีกทั้งเป็นวัสดุที่คุณสมบัติและเป็นที่ยอมรับนำมาใช้ในงานออกแบบและสร้างสายอากาศ ซึ่งจากการพิจารณาประเภทของวัสดุไดอิเล็กตริกที่วางกันระหว่างแนวระนาบของเส้นลวดบนโครงสร้างสื่อตัวกลางแบบเส้นลวดโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CST ในการทดสอบ จากการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของไดอิเล็กตริกทั้ง 4 ชนิดนั้น พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศที่ทำการออกแบบ (10 GHz) ดังแสดงในรูปที่ 4.48 จากรูปจะเห็นได้ว่าไดอิเล็กตริกชนิดซุปเปอร์ลีนจะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่ดีที่สุดจากการเปรียบเทียบชนิดของไดอิเล็กตริกทั้ง 4 ชนิด นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในส่วนของความกว้างแถบความถี่ พบว่าไดอิเล็กตริกชนิด อากาศ FR4 และซุปเปอร์ลีนนั้นมีความกว้างแถบที่ใกล้เคียงกัน แต่ไดอิเล็กตริกชนิดเทฟลอนนั้นจะมีความกว้างแถบความถี่ที่แคบกว่าไดอิเล็กตริกชนิดอื่นที่ได้นำมาทำการทดสอบซึ่งผลมาจากคุณสมบัติของวัสดุดังกล่าว เมื่อนำมาประกอบรวมกับโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดทำให้คุณสมบัติของคลื่นมาเดินทางผ่านโครงสร้างตัวกลางทำให้เกิดการสะท้อนกลับสูงกว่าวัสดุไดอิเล็กตริกอีก 3 ชนิดที่นำมาพิจารณา ดังนั้นในการพิจารณาไดอิเล็กตริกที่วางระหว่างแนวระนาบของเส้นลวดบนโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด ในการวิจัยนี้จึงได้ทำการเลือกไดอิเล็กตริกชนิดซุปเปอร์ลีนมาใช้วางกันระหว่างชั้นของแนวระนาบเส้นลวดบนโครงสร้างสื่อตัวกลางแบบเส้นลวด



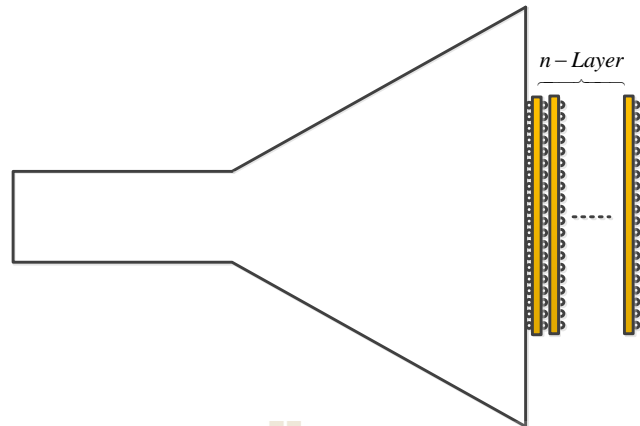
รูปที่ 4.47 รูปแบบการพิจารณาชนิดของไดอิเล็กตริก



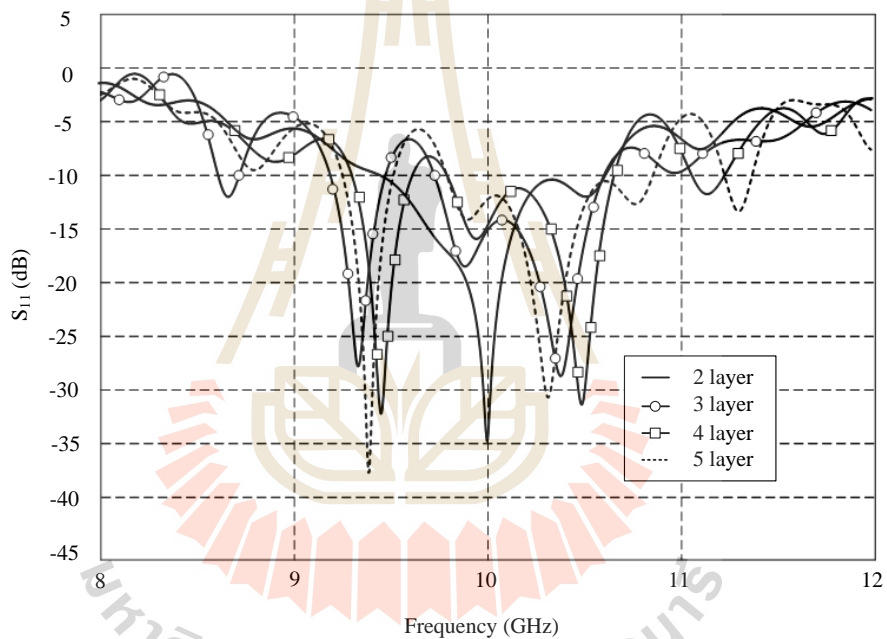
รูปที่ 4.48 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับชนิดของไดอิเล็กตริกที่วางกันระหว่างชั้นของแนวระนาบตัวกลางแบบเส้นลวด

4.6.3 การพิจารณาจำนวนชั้นของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด

ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอการพิจารณาจำนวนชั้น (layer) ของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด ซึ่งในการพิจารณาได้ทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยเลือกค่าพารามิเตอร์ที่ได้ทำการพิจารณาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา ในการพิจารณาจำนวนชั้นของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดนั้นจะทำการเพิ่มจำนวนชั้นของแนวระนาบเส้นลวดคือ 2, 3, 4, และ 5 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.49 ในการเพิ่มจำนวนชั้นของแนวระนาบเส้นลวดนั้นระหว่างชั้นของแนวระนาบเส้นลวดมีไดอิเล็กตริก ชนิดซูเปอร์สทินวางคั่นระหว่างแต่ละชั้นอยู่และโครงสร้างสื่อตัวกลางแบบเส้นลวดในชั้นแรกวางอยู่บนแนวระนาบปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตรรูปกรวย จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ในการพิจารณาจำนวนชั้นของสื่อตัวกลางแบบเส้นลวดนั้นพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สะท้อนกลับเมื่อจำนวนชั้นของตัวกลางแบบเส้นลวดมีจำนวนชั้นเท่ากับ 2 ชั้นจะทำให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศที่ได้ออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.50 และเมื่อทำการเพิ่มจำนวนชั้นของตัวกลางแบบเส้นลวดขึ้นเป็นจำนวน 3 ชั้นจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่เรโซแนนซ์มีการเลื่อนออกไปจากความถี่เรโซแนนซ์ที่ออกแบบ จากผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST จึงสามารถสรุปได้ว่าจำนวนชั้นของตัวกลางแบบเส้นลวดที่เหมาะสมในการออกแบบวางบนแนวระนาบปากอะเพอร์เจอร์สายอากาศปากแตรรูปกรวยอยู่ที่จำนวน 2 ชั้น ซึ่งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ความถี่เรโซแนนซ์สายอากาศปากแตร ณ ความถี่กลางที่ทำการออกแบบ (10GHz)



รูปที่ 4.49 รูปแบบการพิจารณาจำนวนชั้นของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด

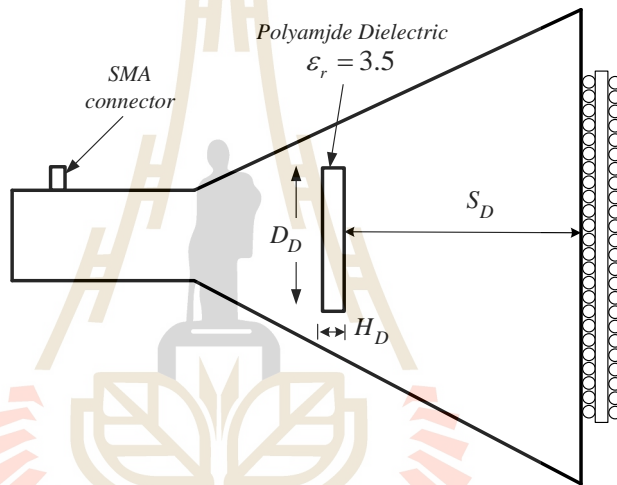


รูปที่ 4.50 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเมื่อทำการเพิ่มจำนวนชั้นของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด

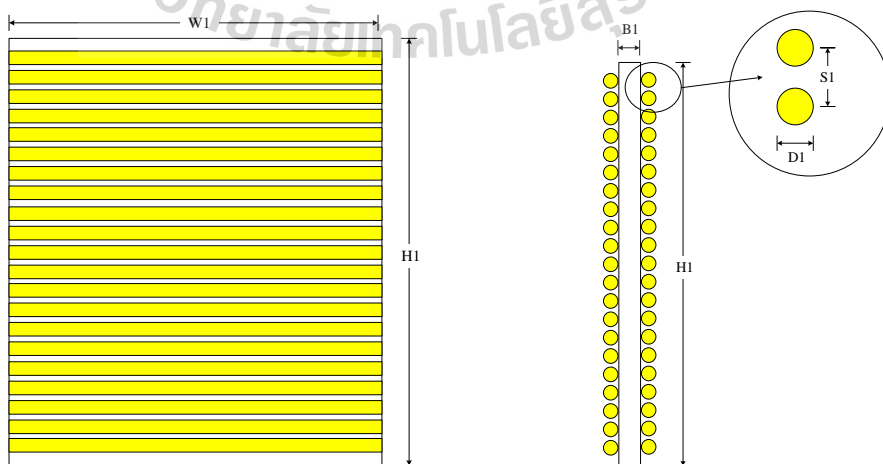
4.6.4 สายอากาศปากแตรรูปรวยโดยใช้เทคนิคอภิวัดบนโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่นำเสนอ

จากการขั้นตอนการออกแบบและวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศปากแตรรูปรวยโดยใช้เทคนิคอภิวัดบนโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดจนได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศปากแตรรูปรวย ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศที่สมบูรณ์ของสายอากาศปากแตรรูปรวยโดยใช้เทคนิคอภิวัดบนโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่นำเสนอแสดงในรูปที่ 4.51 ซึ่งประกอบด้วยการใช้เทคนิคการใส่โหนดไดอิเล็กทริกเข้าไปภายใน

สายอากาศเพื่อปรับปรุงแบบรูปการแผ่พลังงานให้มีความสมมาตรในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก อีกทั้งช่วยลดระดับพู่ข้างให้ต่ำลง อีกส่วนหนึ่งคือโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดถือได้ว่าเป็นส่วนสำคัญหลักในงานวิจัยนี้ที่นำเสนอ โดยจะทำหน้าที่ในการเพิ่มอัตราขยายและปรับปรุงแบบรูปการแผ่พลังงาน ซึ่งในการออกแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดได้ทำการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จนได้ค่าที่เหมาะสมโดยรูปแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.52 โดยได้ทำการสรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้เทคนิคอภิวัดบนโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่นำเสนอดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.6 และในรูปที่ 4.53 แสดงโครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีใช้เทคนิคอภิวัดบนโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่นำเสนอด้วยโปรแกรม CST เพื่อจำลองผลการออกแบบ



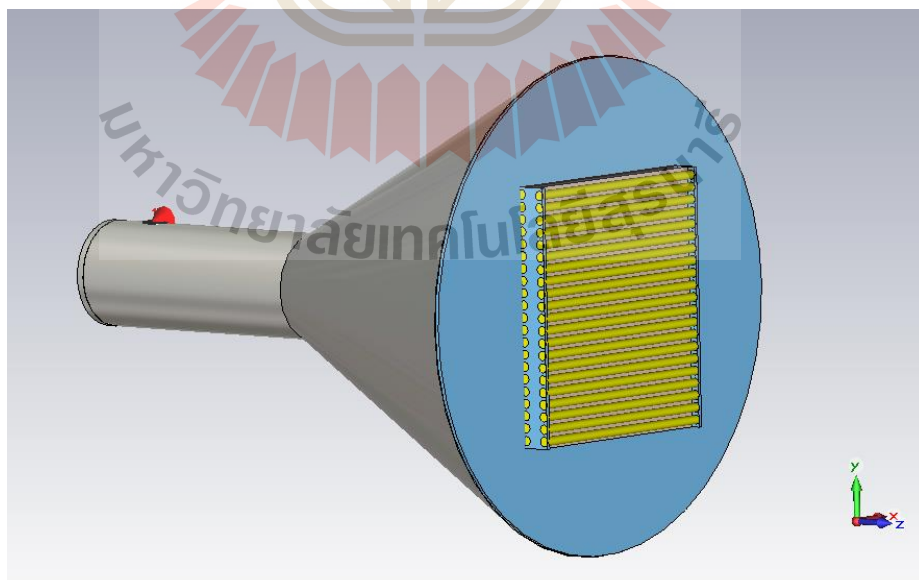
รูปที่ 4.51 โครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติอภิวัดบนโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่นำเสนอ



รูปที่ 4.52 โครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่นำเสนอ

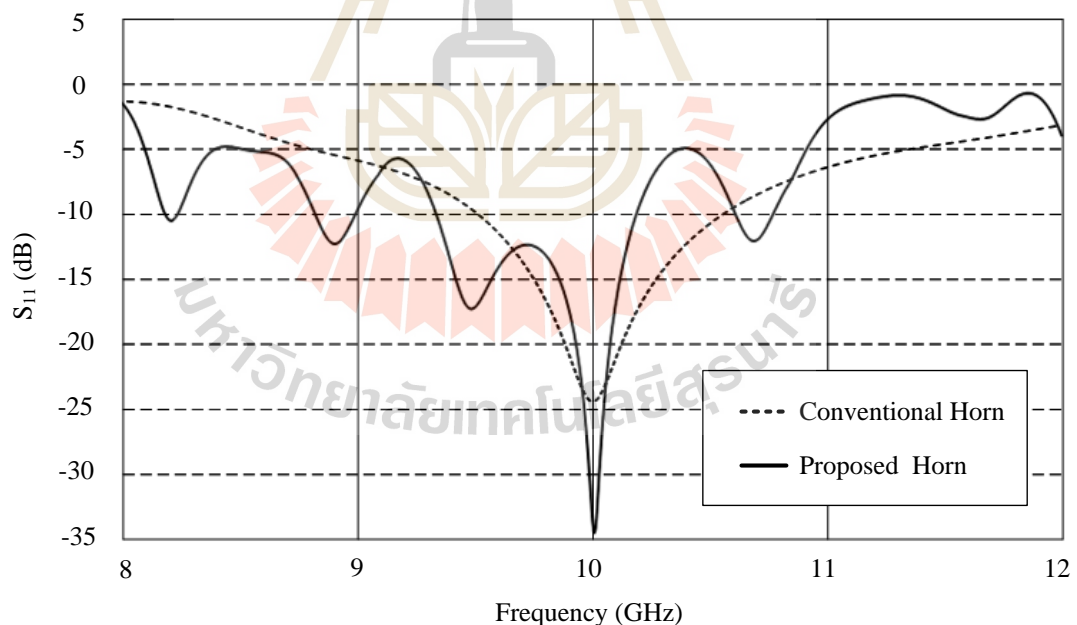
ตารางที่ 4.6 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้เทคนิคอภิวัดบน
โครงสร้างสื่อตัวกลางแบบเส้นลวดที่สมบูรณ์

ค่าพารามิเตอร์	ขนาด (λ)	ขนาด (mm)
เส้นผ่าศูนย์กลางปากอะเพอร์เจอร์สายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน (d_m)	4λ	120
ความยาวของสายอากาศปากแตรรูปกรวย (L_1)	3.75λ	112.5
เส้นผ่าศูนย์กลางท่อนำคลื่นรูปทรงกระบอก (d_w)	0.86λ	26
ความยาวท่อนำคลื่นรูปทรงกระบอก (l_w)	2λ	60
ความหนาของโพลติไดอิเล็กตริก (H_D)	$\lambda/4$	7.5
เส้นผ่าศูนย์กลางของโพลติไดอิเล็กตริก (D_D)	λ	30
ระยะตำแหน่งการวางโพลติไดอิเล็กตริก (S_D)	2.554λ	76.24
ความหนาของไดอิเล็กตริกตัวกลางแบบเส้นลวด (B_1)	0.166λ	3.5
ความกว้างของไดอิเล็กตริกตัวกลางแบบเส้นลวด (W_1)	2λ	60
ความสูงของไดอิเล็กตริกตัวกลางแบบเส้นลวด (H_1)	2.26λ	68
ระยะห่างระหว่างเส้นลวดที่วางขนานกัน (S_1)	0.166λ	3.5
เส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวด (D_1)	0.083λ	2.5

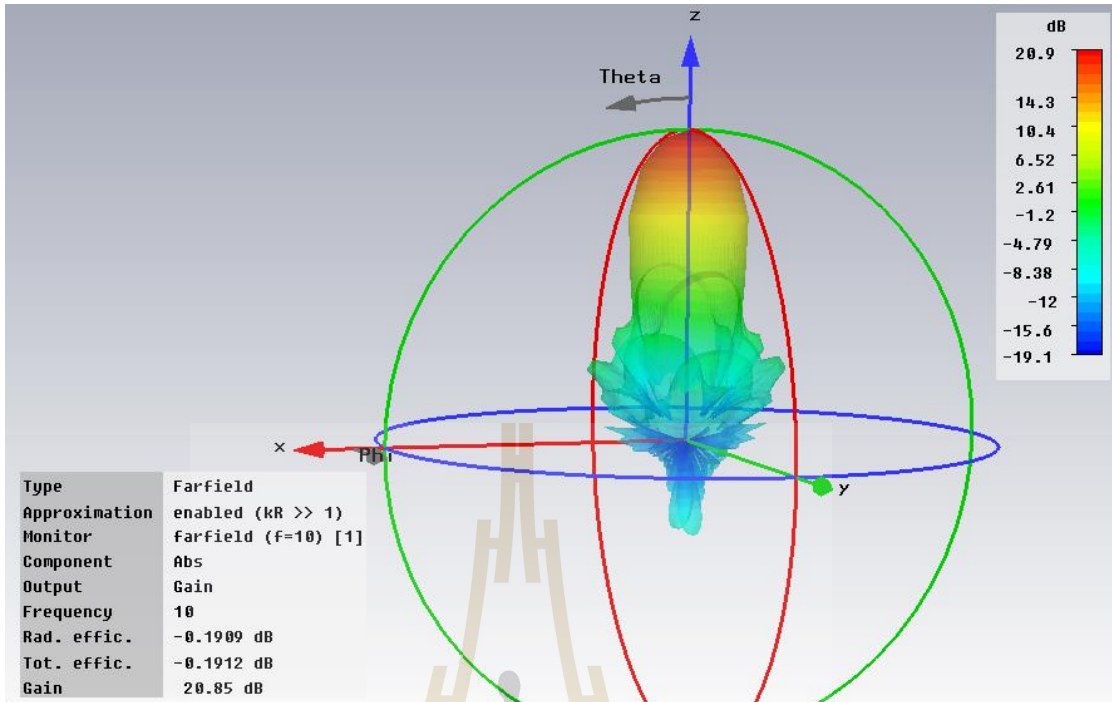


รูปที่ 4.53 โครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติอภิวัดบนโครงสร้าง
ตัวกลางแบบเส้นลวดที่ทำการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST

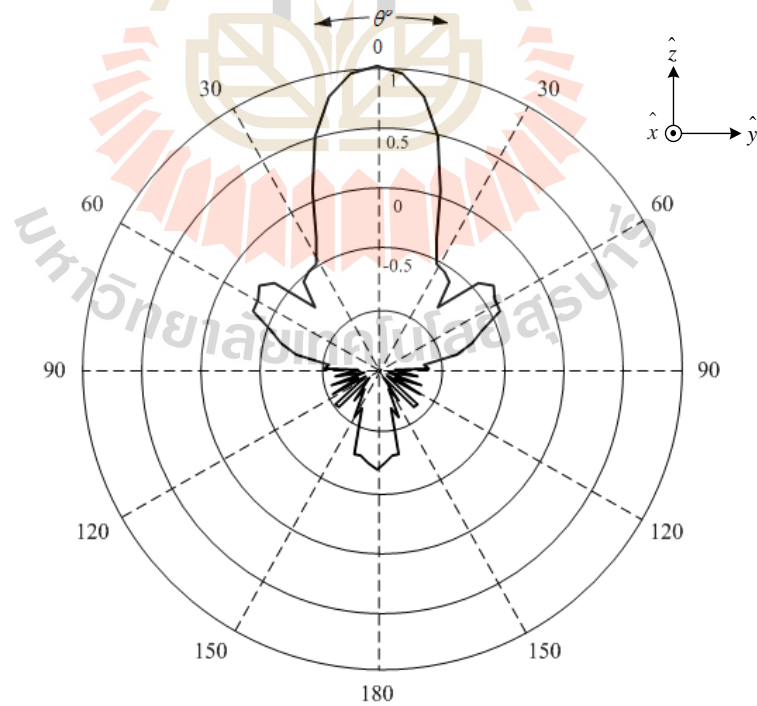
จากค่าพารามิเตอร์ข้างต้นดังตารางที่ 4.5 ได้ทำการนำไปทำการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 4.53 ผลการจำลองประสิทธิภาพของสายอากาศซึ่งในรูปที่ 4.54 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้เทคนิคอภิวัดบนโครงสร้างสี่ตัวกลางแบบเส้นลวดพบว่าสายอากาศทั้งสองแบบตอบสนองต่อความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่กลางที่ทำการออกแบบ (10 GHz) โดยจะเห็นได้ว่าความกว้างแถบความถี่ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยที่นำเสนอจะแคบกว่าสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐานเล็กน้อย เนื่องจากผลกระทบจากโครงสร้างสี่ตัวกลางแบบเส้นลวดนั่นเอง เมื่อพิจารณาในส่วนของการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.55 และ 4.56 โดยในรูปที่ 4.55 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบ 3 มิติที่ได้จากโปรแกรม CST และในรูปที่ 4.56 ได้แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กของสายอากาศที่ได้นำเสนอ สังเกตได้ว่าแบบรูปการแผ่พลังงานในทั้งสองระนาบนั้นมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่สมมาตรและโดยมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่แคบลงเมื่อทำการเปรียบเทียบกับสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐานและมีระดับของพูข้างที่ต่ำ โดยที่ระดับพูข้างในระนาบสนามไฟฟ้าเท่ากับ -26.6 dB และระนาบสนามแม่เหล็กเท่ากับ -26.8 dB



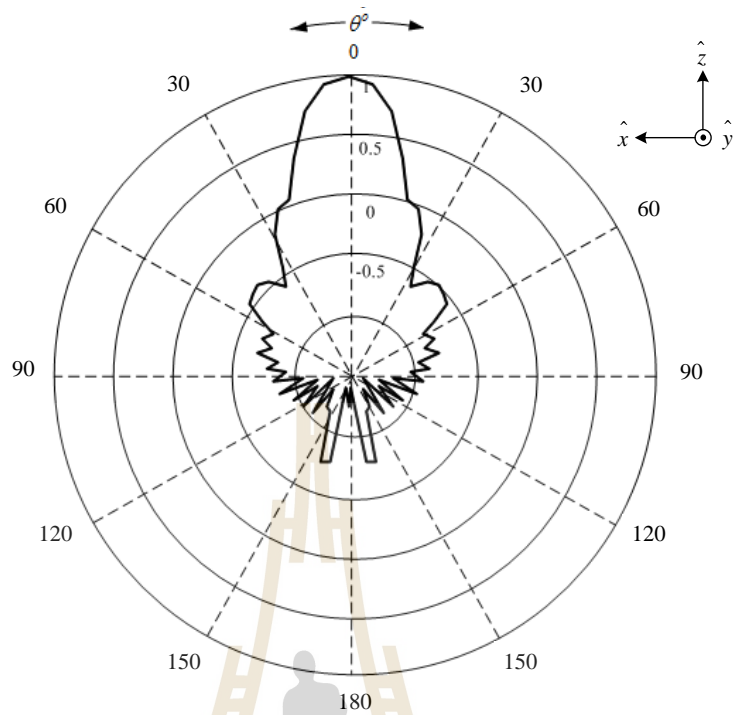
รูปที่ 4.54 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับระหว่างสายอากาศปากแตรมาตรฐานกับสายอากาศที่นำเสนอ



รูปที่ 4.55 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบ 3 มิติของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้เทคนิคอภิวัดหุ่นโครงสร้างสื่อตัวกลางแบบเส้นลวดที่นำเสนอนี้ทำการจำลองการออกแบบด้วยโปรแกรม CST



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

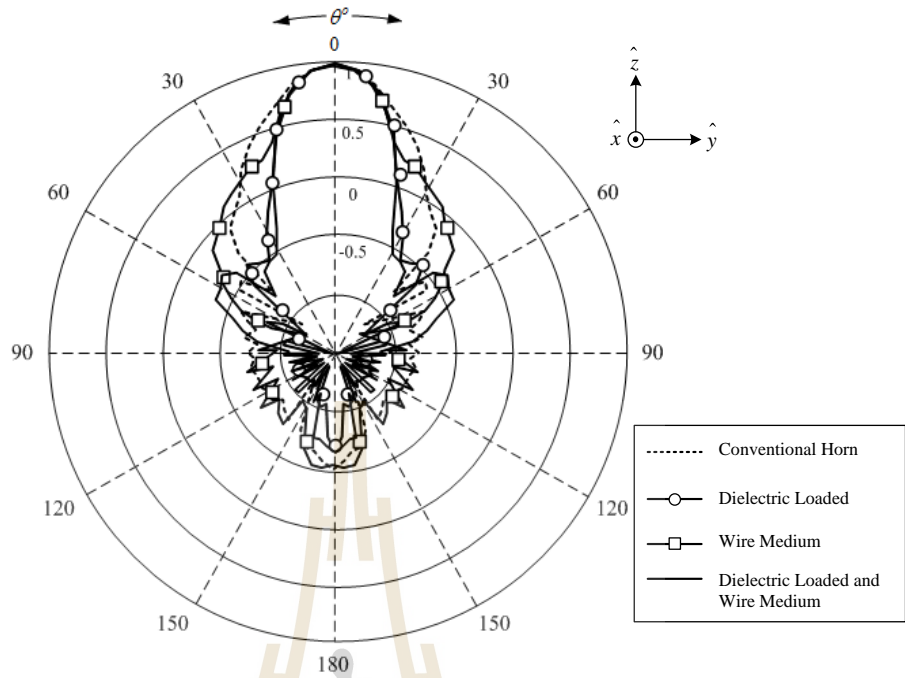


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

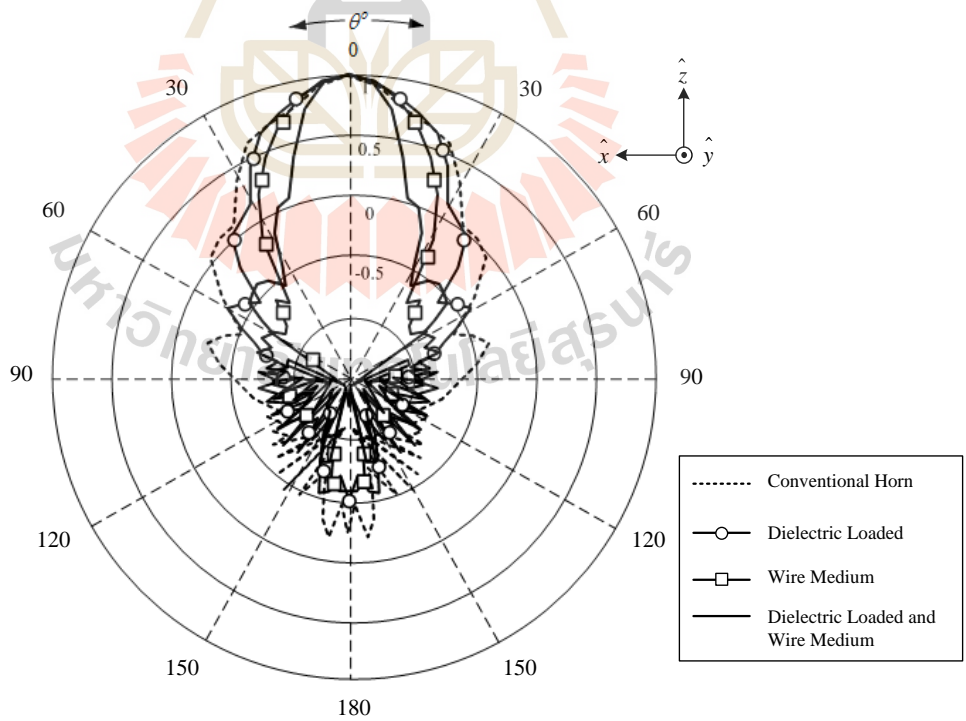
รูปที่ 4.56 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้เทคนิคอภิวัดบนโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่นำเสนอ

4.7 การพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวย

เมื่อทำการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศจนกระทั่งได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเรียบร้อยแล้ว ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศใน 4 รูปแบบ คือ สายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน สายอากาศปากแตรกรณีใส่โหนดไดอิเล็กทริกเข้าไปภายในสายอากาศ สายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีใส่โครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดบนแนวระนาบปากอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศ และสายอากาศที่นำเสนอ ซึ่งประกอบด้วยการใส่โหนดไดอิเล็กทริกเข้าไปภายในสายอากาศและการใส่โครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดบนแนวระนาบปากอะเพอร์เจอร์สายอากาศ จากการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศทั้ง 4 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 4.57 พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศทั้ง 4 รูปแบบสายอากาศที่นำเสนอนั้นมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่ดีที่สุดโดยมีความกว้างแถบความถี่ที่แคบและระดับพูซังที่ต่ำกว่าสายอากาศทั้งสามรูปแบบ



(ก) ระบายสนามไฟฟ้า



(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.57 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ทำการศึกษา 4 รูปแบบ

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวย 4 รูปแบบ

แบบสายอากาศ	อัตราขยาย [dB] ที่ 10 GHz	ระดับพู่ข้าง [dB] ที่ 10 GHz	
		ระนาบ สนามไฟฟ้า	ระนาบ สนามแม่เหล็ก
สายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน	17.7	-29.4	-22.7
สายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีใส่โพลดไดอิเล็กตริก	18.4	-24.5	-25.9
สายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีใส่โครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่แนวระนาบปากอะเพอร์เจอร์	20.9	-23.8	-20.9
สายอากาศปากแตรรูปกรวยที่นำเสนอ (กรณีใส่โพลดไดอิเล็กตริกและตัวกลางแบบเส้นลวด)	20.9	-26.6	-26.8

ในตารางที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวย 4 รูปแบบที่ทำการพิจารณา จากตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการใส่โพลดไดอิเล็กตริกเข้าไปภายในสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐานพบว่าแบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้สมมาตรและระดับพู่ข้างของระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีระดับต่ำลงจากเดิมอีกทั้งระดับพู่ข้างมีระดับที่ใกล้เคียงกันในทั้งสองระนาบ และเมื่อทำการเพิ่มโครงสร้างสื่อตัวกลางแบบเส้นลวดเข้าไปพบว่าแบบรูปการแผ่พลังงานสมมาตรและระดับโพลดข้างลดลงจากเดิมโดยระดับพู่ข้างระนาบสนามไฟฟ้ามามีค่าเท่ากับ -26.6 dB และระนาบสนามไฟฟ้ามามีค่าเท่ากับ -26.8 dB และอัตราขยายของสายอากาศที่ได้เท่ากับ 20.9 dB ซึ่งเพิ่มขึ้นจากสายอากาศปากแตรมาตรฐาน 3.2 dB

จากขั้นตอนในการออกแบบและวิเคราะห์การเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศปากแตรรูปกรวยที่ได้ทำการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จนได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้อิวิสต์บอนโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดนั้น ในการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานในงานวิจัยนี้ ได้นำเทคนิคการใส่โพลดไดอิเล็กตริกมาทำการปรับปรุงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวย เพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานสมมาตรและระดับพู่ข้างต่ำ เมื่อได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่ออกจากสายอากาศที่สมมาตรและระดับพู่ข้างต่ำเมื่อเทียบกับสายอากาศมาตรฐาน ต่อจากนั้นได้ทำการนำเทคนิคคุณสมบัติอิวิสต์บอนโครงสร้างสื่อตัวกลางแบบเส้นลวดมาเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศปากแตรรูป

กรวยเพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ ซึ่งรายละเอียดของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.6

4.7 สรุป

สำหรับบทนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบ และวิเคราะห์สายอากาศปากแตรรูปกรวย โดยใช้เทคนิคอภิวัดคุณบนโครงสร้างโพรงช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าแบบดอกเห็ดซึ่งจากการออกแบบพัฒนาพบว่าเทคนิคดังกล่าวสามารถลดขนาดความยาวของสายอากาศลงมาจากเดิมประมาณ 30 มิลลิเมตร โดยที่สายอากาศยังมีอัตราขยายเท่าเดิม หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติอภิวัดคุณในรูปแบบอื่นๆ โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ และเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเทคนิคอภิวัดคุณบนโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดนั้นถือได้ว่ามีคุณสมบัติที่น่าสนใจในการนำมาออกแบบพัฒนาร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ซึ่งในขั้นแรกได้ทำการศึกษาโครงสร้างของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน จากนั้นทำการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง ไดโอดีเล็กทรอนิกส์เพื่อปรับปรุงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐาน หลังจากนั้นได้ทำการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด ที่มีโครงสร้างและตำแหน่งการวางบนสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐานที่เหมาะสมเพื่อช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ โดยสายอากาศที่ได้มีอัตราขยายเพิ่มขึ้น ระดับพูซังต่ำ และHPBW ที่แคบโดยทำการจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ก่อนเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของสายอากาศปากแตรรูปกรวย โดยใช้เทคนิคอภิวัดคุณบนโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดสำหรับการนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบต่อไป

บทที่ 5

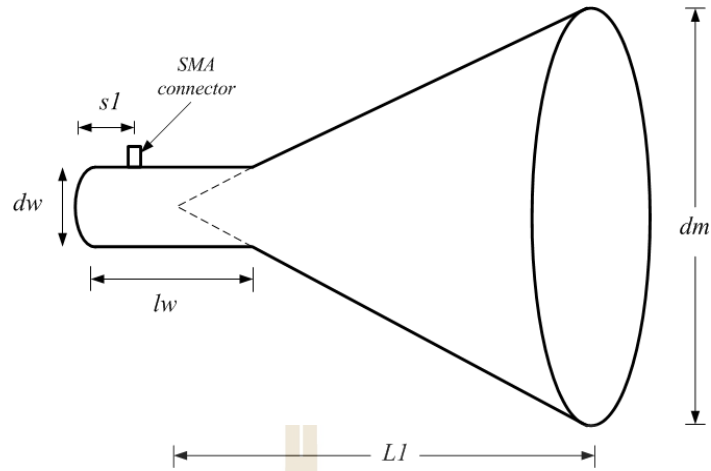
การสร้างและวัดทดสอบ

5.1 บทนำ

จากทฤษฎีและหลักการทั้งหมดที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ผ่านมา ในบทนี้ได้ทำการออกแบบสายอากาศต้นแบบตามคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้เทคนิคอภิวัดสอบ โครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด และได้ทำการสร้างสายอากาศต้นแบบขึ้น จากนั้นทำการวัดทดสอบคุณลักษณะต่างๆ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ แบบรูปการแผ่พลังงานทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก และอัตราขยาย ซึ่งในการวัดทดสอบคุณลักษณะข้างต้นจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (network analyzer) PNA รุ่น N5224A โดยทำการทดสอบในห้องไม่สะท้อนคลื่น (anechoic chamber) จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์และจากผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST พร้อมอภิปรายผล

5.2 สายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน

ในการสร้างสายอากาศต้นแบบและการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้เทคนิคอภิวัดสอบ โครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดนั้น ในการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ นั้นโดยเริ่มต้นทำการสร้างและทดสอบสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน ซึ่งได้แสดงวิธีการออกแบบและวิเคราะห์ผลการออกแบบไว้ในบทที่ 4 จากการจำลองโครงสร้างสายอากาศปากแตรเพื่อวิเคราะห์ผลการออกแบบของสายอากาศด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST จนได้ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศตามที่ต้องการซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบดังแสดงค่าในตารางที่ 5.1 โดยนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากตารางที่ 5.1 นำมาทำการสร้างสายอากาศต้นแบบซึ่งโครงสร้างและสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานต้นแบบที่สร้างขึ้นได้แสดงดังรูปที่ 5.1 หลังจากได้สายอากาศต้นแบบที่สร้างขึ้นจึงทำการนำสายอากาศต้นแบบมาทำการวัดและทดสอบค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ค่าอิมพีแดนซ์สายอากาศและแบบรูปการแผ่พลังงานซึ่งในการวัดและทดสอบสายอากาศต้นแบบที่ทำการสร้างขึ้นนั้น โดยทำการวัดและทดสอบสายอากาศภายในห้องไม่สะท้อน



(ก) โครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน



(ข) สายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานต้นแบบที่สร้างขึ้น

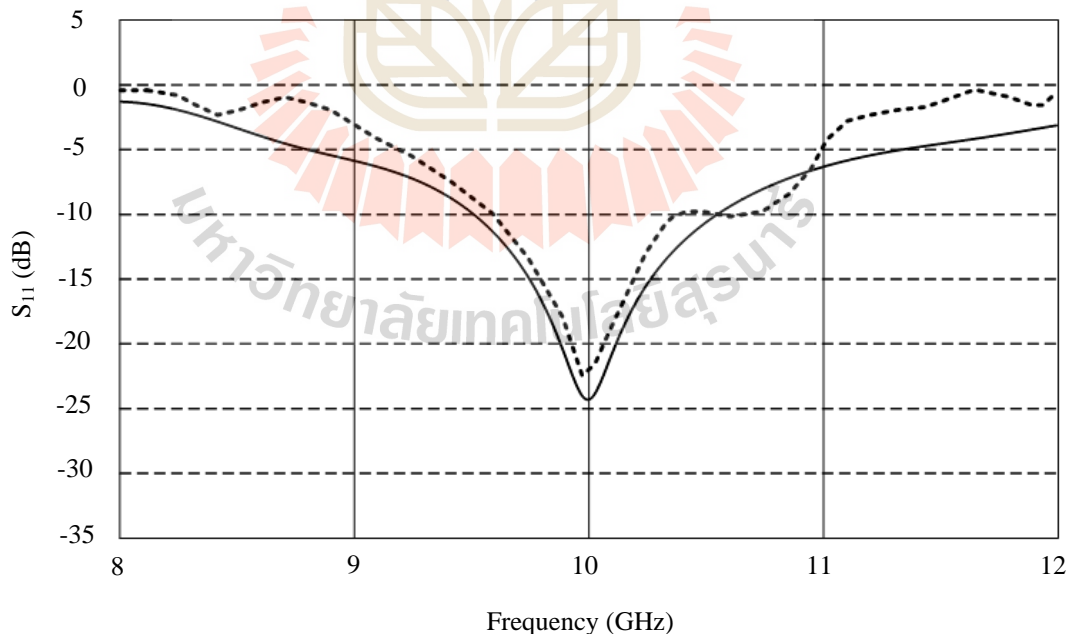
รูปที่ 5.1 สายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานต้นแบบ

พารามิเตอร์	ขนาด (λ)	ขนาด (mm)
เส้นผ่าศูนย์กลางปากอะเพอร์เจอร์สายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน (d_m)	4	120
ความยาวของสายอากาศปากแตรรูปกรวย (L_1)	3.75	112.5
เส้นผ่าศูนย์กลางท่อนำคลื่นรูปทรงกระบอก (d_w)	0.86	26
ความยาวท่อนำคลื่นรูปทรงกระบอก (l_w)	2	60

5.2.1 ผลการวัดทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน

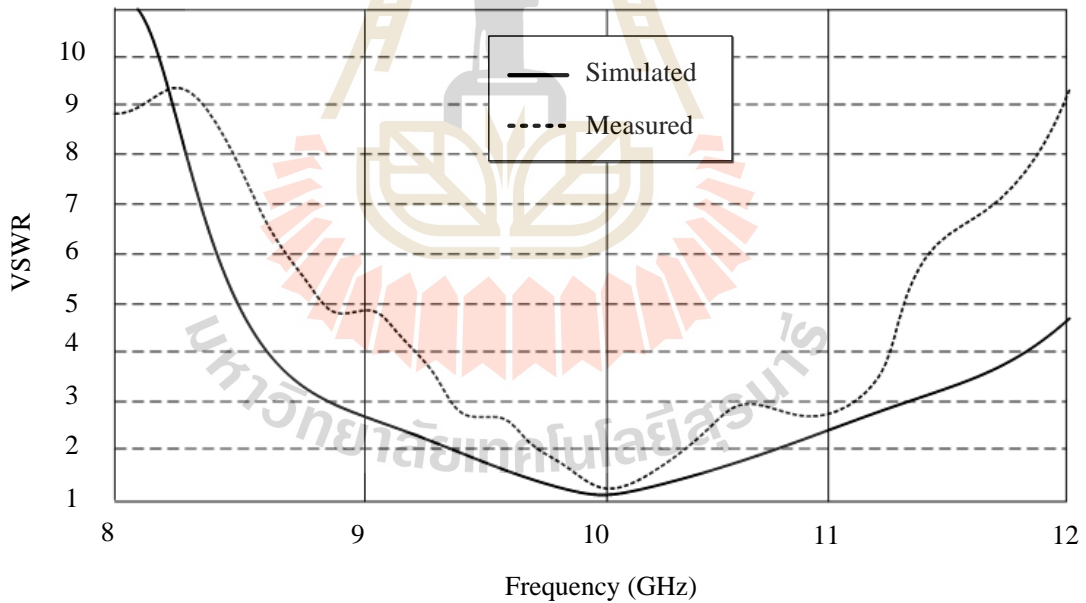
สำหรับพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการพิจารณาการแมตซ์คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ซึ่งเป็นการพิจารณาการสะท้อนกลับของกำลังไฟฟ้าด้านเข้าของสายอากาศซึ่งขนาดของ S_{11} อาจจะมีค่าได้ตั้งแต่ 0 dB ถึง ลบอนันต์ (negative infinity dB) ถ้ามีค่าเท่ากับ 0 dB แสดงว่าไม่ แมตซ์อย่างสมบูรณ์ และถ้ามีค่าลบเป็นอนันต์ แสดงว่ามีการแมตซ์ที่สมบูรณ์ดีที่สุด (รังสรรค์ และ ชูวงศ์) ในการใช้งานด้านวิศวกรรมสายอากาศค่าของ S_{11} ที่ยอมรับได้ถ้ามีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับ -10 dB ซึ่งจะสอดคล้องกับค่า SWR ที่มาค่าเท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า จึงถือว่าเป็นที่ยอมรับได้ว่าสายอากาศนั้นมีการแมตซ์ที่ดี จากรูปที่ 5.2 ได้ทำการแสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลการวัดทดสอบและผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ของค่า S_{11} ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าที่ความถี่ปฏิบัติการ 10 GHz ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยต้นแบบมีค่า S_{11} เท่ากับ -24.62 dB และ -24.25 dB ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่ากราฟทั้งสองมีความสอดคล้องกัน ณ ความถี่ปฏิบัติการ นอกจากนี้ยังพบว่าความกว้างแถบความถี่ที่ได้จากผลการวัดและทดสอบมีความกว้างแถบความถี่น้อยกว่าผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST เล็กน้อย โดยผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST มีค่าเปอร์เซ็นต์ความกว้างแถบเท่ากับ 11% และจากผลการวัดเท่ากับ 9.34 %



รูปที่ 5.2 กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อนระหว่างผลการจำลองและผลวัดทดสอบของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานต้นแบบ

5.2.2 ผลการวัดทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

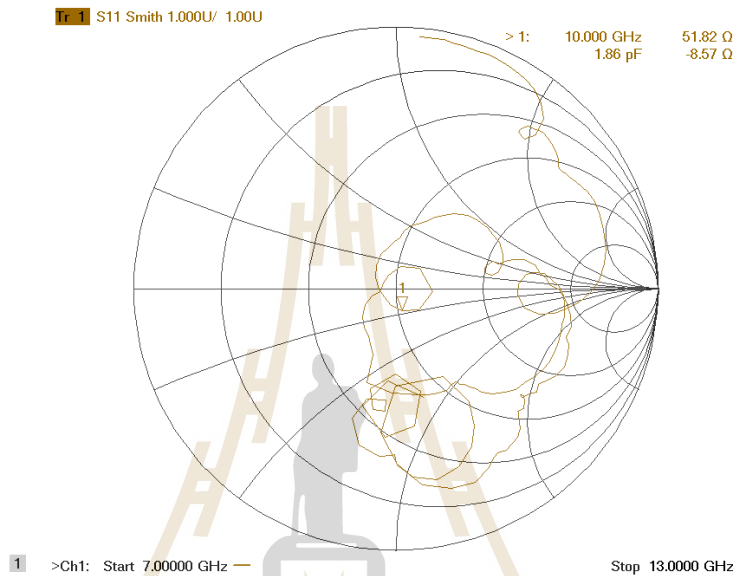
จากสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานต้นแบบที่ทำการสร้างขึ้นมาเรียบร้อยแล้ว ค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของสายอากาศอีกค่าหนึ่งก็คือค่าความสำคัญเป็นอย่างมาก คือค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) สำหรับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งนี้สามารถมีค่าต่ำสุดตั้งแต่ 1 ถึงอนันต์ โดยหากค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งมีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าสายอากาศนั้นมีการแมตช์ที่สมบูรณ์ หมายความว่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้าที่ป้อนให้กับสายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานออกไปทั้งหมดโดยไม่มีการสะท้อนกลับมา และถ้าสายอากาศมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับอนันต์ หมายความว่าสายอากาศนั้นไม่แมตช์ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ส่งออกไปเกิดการสะท้อนกลับมาทั้งหมดซึ่งจะส่งผลให้เครื่องส่งได้รับความเสียหายได้ จากการวัดทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานต้นแบบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแล้วทำการเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST จากผลการเปรียบเทียบดังแสดงได้ในรูปที่ 5.3 พบว่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ได้จากการวัดมีค่าเท่ากับ 1.3 และผลที่ได้จากการจำลองมีค่าเท่ากับ 1.12 ซึ่งพบว่าการแสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งของผลการจำลองและการวัดมีความสัมพันธ์และสอดคล้องกัน



รูปที่ 5.3 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนคลื่นนิ่งระหว่างผลการจำลองและผลวัดทดสอบสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน

5.2.3 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์

จากการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ที่ความถี่ปฏิบัติการ 10 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 5.4 มีค่าอิมพีแดนซ์ เท่ากับ 51.82Ω ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ยอมรับได้ คือ 50Ω



รูปที่ 5.4 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานต้นแบบ

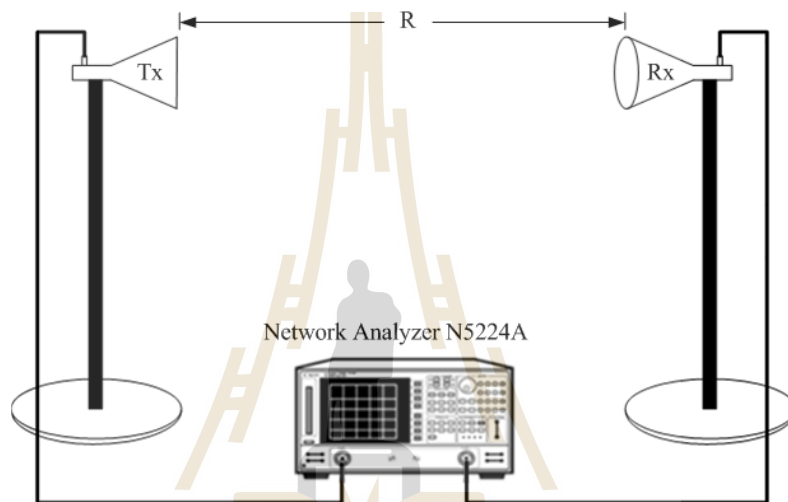
5.2.4 ผลการวัดทดสอบอัตราขยาย

ในการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศนั้นได้ทำการวัดทดสอบในห้องไม่สะท้อนคลื่น โดยมีระยะ R คือระยะห่างระหว่างการติดตั้งสายอากาศต้นแบบที่ทำการวัดทดสอบกับสายอากาศอ้างอิงเท่ากับหรือมากกว่าสามระยะไกล คือ $R \geq 2D^2/\lambda$ โดยที่ D คือ ขนาดของสายอากาศวัดทดสอบ จากการคำนวณสามระยะไกลได้ระยะ $R \geq 0.5$ เมตร ซึ่งในการวัดทดสอบนี้ได้กำหนดให้ระยะ $R = 1$ เมตรเพื่อใช้ในการวัดทดสอบ โดยใช้สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากซึ่งมีความถี่ปฏิบัติการอยู่ที่ 10 GHz เป็นสายอากาศอ้างอิงมาทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่งซึ่งสายอากาศดังกล่าวได้มีการวัดทดสอบมาตรฐานอัตราขยายเรียบร้อยแล้วโดยมีอัตราขยายที่ความถี่ปฏิบัติการ 10 GHz เท่ากับ 18.218 dBi และสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานต้นแบบที่จะทำการวัดทดสอบเป็นสายอากาศภาครับ ดังแสดงในรูปที่ 5.5 จากนั้นใช้สมการการส่งผ่านของฟรีส (Friis transmission equation) เป็นพื้นฐานในการคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ โดยสมการส่งผ่านของฟรีสที่นำมาใช้คือ

$$G_{r_{dB}} = P_{r_{dB}} - P_{t_{dB}} - G_{t_{dB}} + 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (5.1)$$

โดยที่

- G_{dB} คือ อัตราขยายรวมของสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ
 G_t คือ อัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง
 G_r คือ อัตราขยายของสายอากาศภาครับ
 R คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ (เมตร)



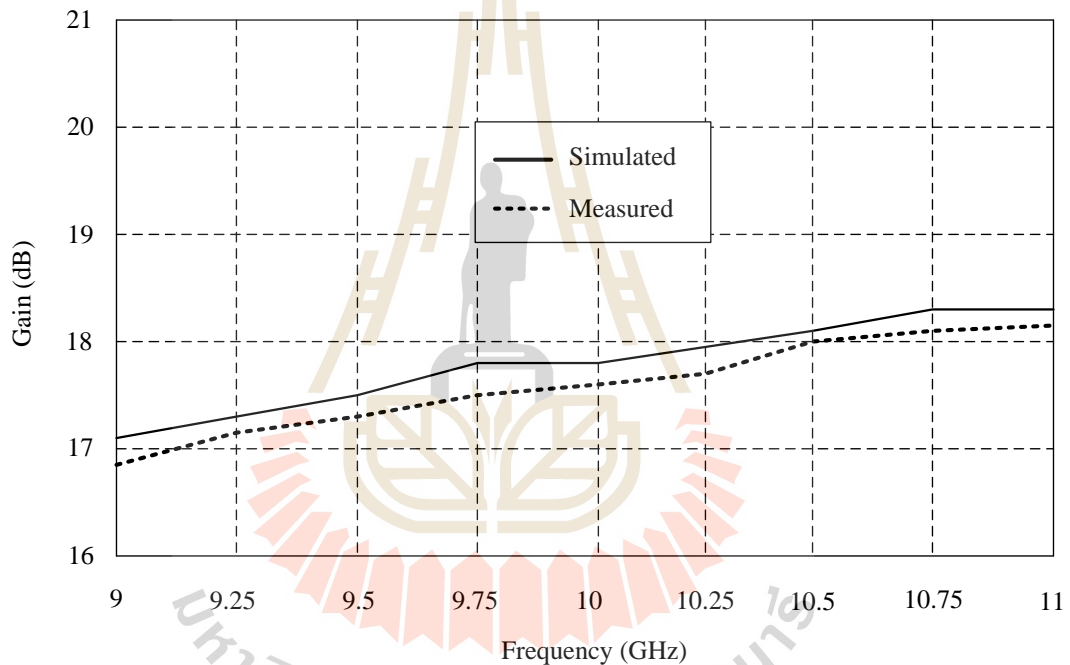
(ก) แสดงวิธีการวัดทดสอบอัตราขยาย



(ข) การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบอัตราขยาย

รูปที่ 5.5 วิธีการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐาน

จากผลการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐานต้นแบบพบว่ามีอัตราขยายเท่ากับ 17.342 dBi นอกจากนี้ในการวัดทดสอบได้ทำพิจารณาการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐานต้นแบบในช่วงความถี่แถบความถี่ของสายอากาศโดยทำการเปรียบเทียบอัตราขยายระหว่างผลการวัดทดสอบและผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST โดยทำการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศในช่วงความถี่ตั้งแต่ 9 GHz – 11 GHz ซึ่งในขั้นตอนการวัดอัตราขยายโดยใช้วิธีการวัดอัตราขยายตามที่ได้กล่าวไว้แล้ว ซึ่งสายอากาศที่นำมาใช้เป็นสายอากาศในภาคส่งคือสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ได้ทำการทดสอบมาตรฐานอัตราขยายในแต่ละช่วงความถี่เป็นที่เรียบร้อยแล้วโดยกราฟผลการเปรียบเทียบอัตราขยายดังแสดงในรูปที่ 5.6

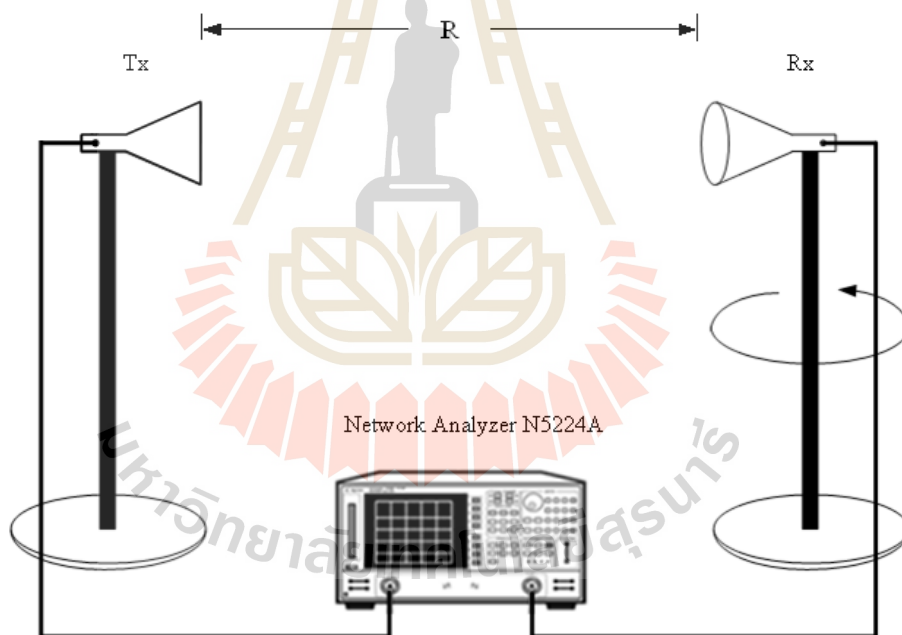


รูปที่ 5.6 ผลการเปรียบเทียบอัตราขยายของสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐานในช่วงความถี่ตั้งแต่ 9 GHz -11 GHz

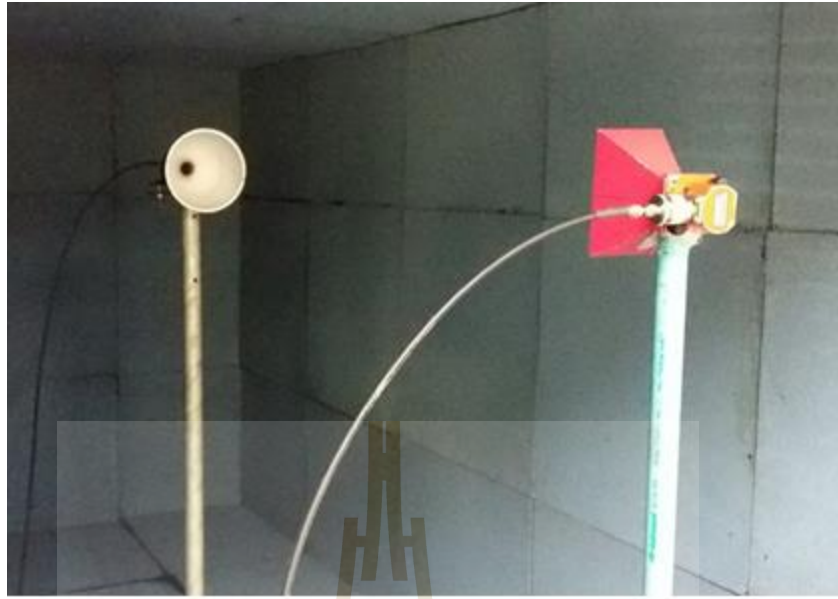
5.2.5 ผลการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน

ในการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานต้นแบบ จากรูปที่ 5.7 แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานในระนาบสนามไฟฟ้าและวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 5.8 โดยในการวัดทดสอบได้ทำการวัดในห้องไม่สะท้อนคลื่นและโดยมีระยะของ R ในการติดตั้งระหว่างสายอากาศต้นแบบที่ทำการวัดทดสอบกับสายอากาศ

อ้างอิงเท่ากับหรือมากกว่าสนามระยะไกล คือ $R \geq 2D^2/\lambda$ โดยที่ค่า D คือ ขนาดของสายอากาศวัดทดสอบ จากการคำนวณสนามระยะไกลได้ระยะ $R \geq 0.5$ เมตร ซึ่งในการวัดทดสอบนี้ได้กำหนดให้ระยะ $R = 1$ เมตร โดยใช้สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากซึ่งมีความถี่ปฏิบัติการอยู่ที่ 10 GHz เป็นสายอากาศอ้างอิงมาทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่ง และในการวัดทดสอบจะทำการหมุนสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน (สายอากาศภาครับ) ซึ่งจะมีการหมุนรอบแนวแกนหมุนในแต่ละระนาบเพื่อรับคลื่นจากสายอากาศภาคส่งตั้งแต่มุม 0 องศา จนถึงมุม 360 องศา ทำให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศทั้งหมดในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 5.9 จากผลการวัดทดสอบสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานต้นแบบ พบว่าแบบรูปการแผ่พลังงานของในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST โดยมีลักษณะของแบบรูปการแผ่พลังงานใกล้เคียงกับแบบรูปทิศทางในระนาบเดียว

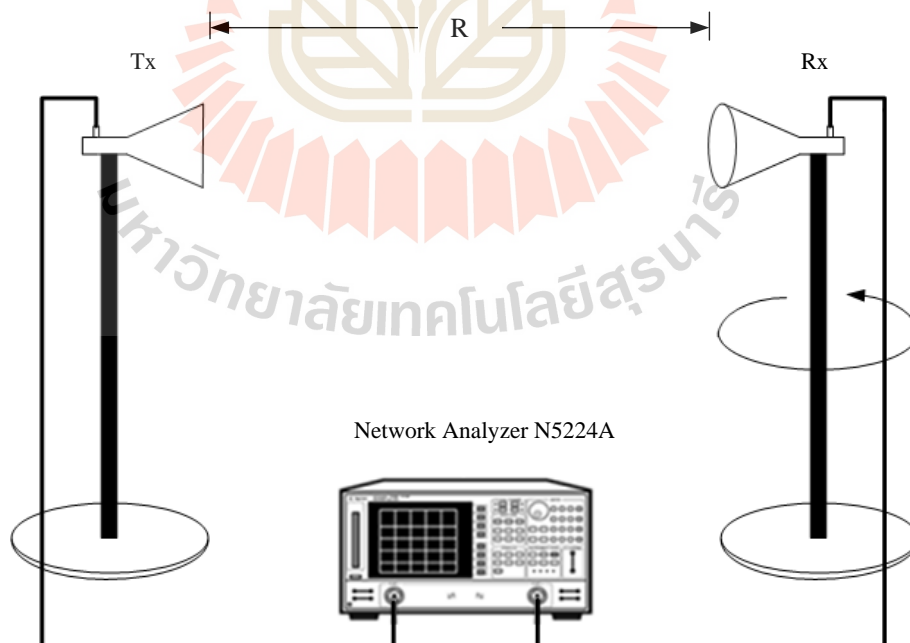


(ก) แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

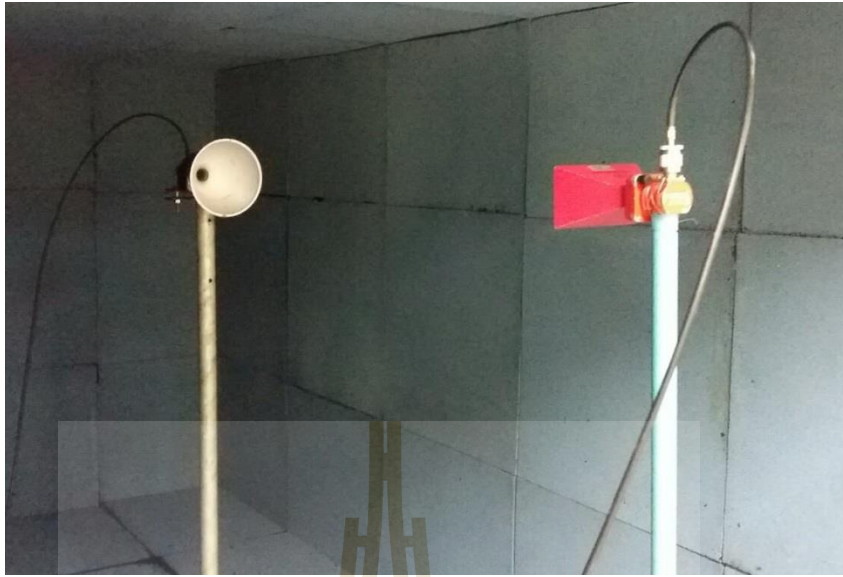


(ข) การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

รูปที่ 5.7 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศปากแตร
ขนาดมาตรฐาน

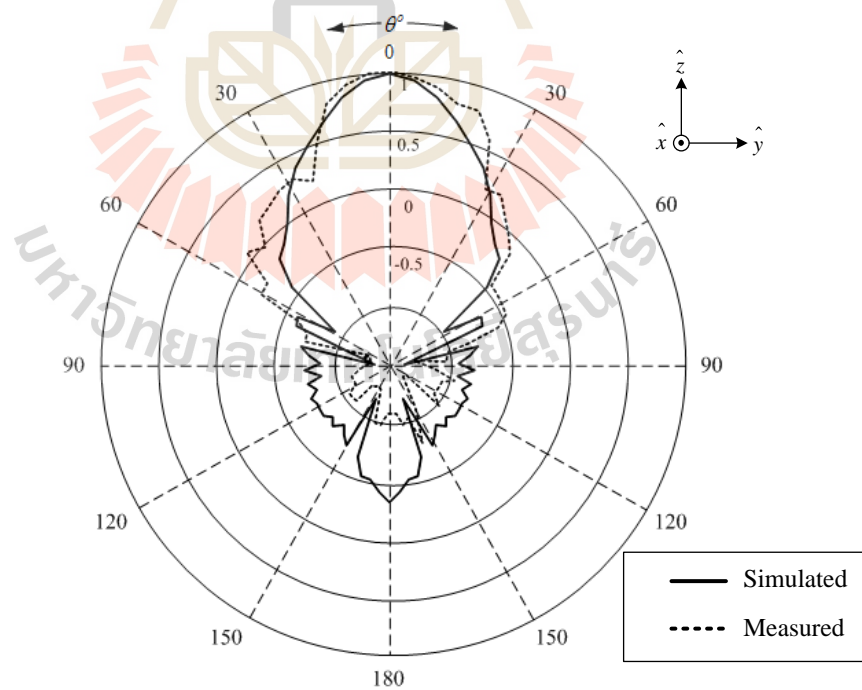


(ก) แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

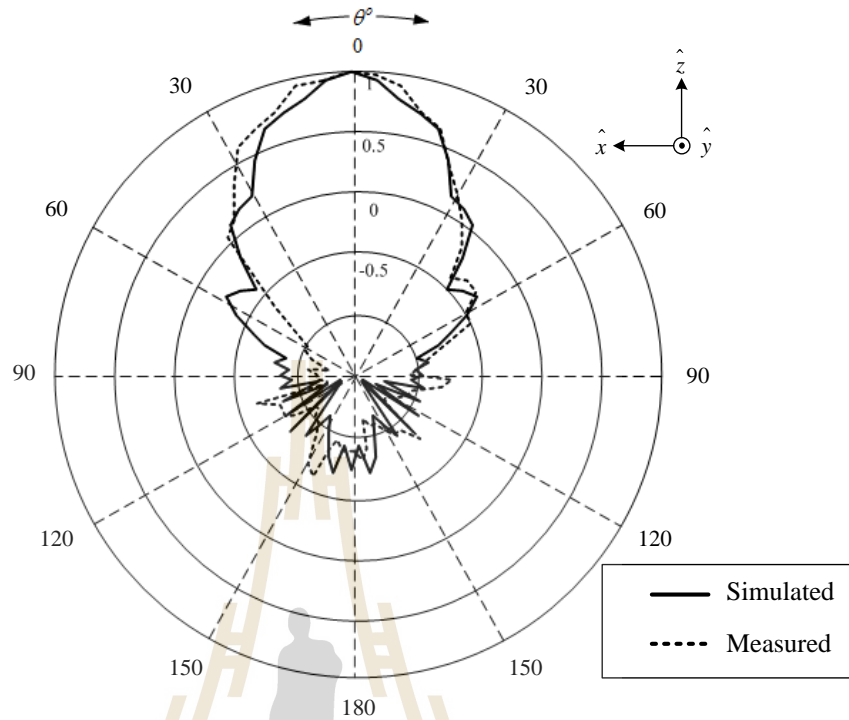


(ข) การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.8 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐาน



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

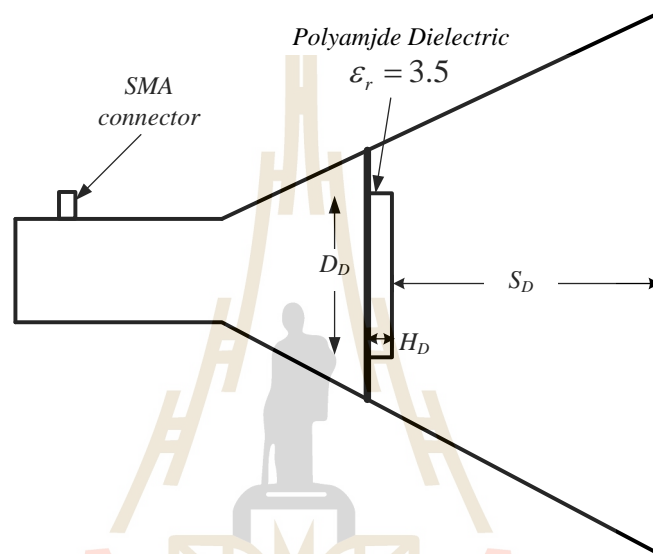
รูปที่ 5.9 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐาน

5.3 สายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีสไลโพลไดอิเล็กตริก

สายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีสไลโพลไดอิเล็กตริกเข้าไปภายในสายอากาศเพื่อทำการปรับปรุงประสิทธิภาพแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐาน เพื่อให้มีแบบรูปการแผ่พลังงานที่สมมาตรขึ้น อีกทั้งลดระดับพู่ข้างให้ลดต่ำลง จากการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีสไลโพลไดอิเล็กตริกจนได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้ว จึงทำการสร้างสายอากาศต้นแบบขึ้นมา โดยในการออกแบบและวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์สำหรับไดอิเล็กตริกที่ใช้ในการสร้างโพลไดอิเล็กตริกคือ ไดอิเล็กตริก ชนิดพอลิเอไมด์ (polyamide) จากการวิเคราะห์วัสดุที่นำมาใช้ในการสร้างโพลไดอิเล็กตริกพบว่าไดอิเล็กตริกชนิดพอลิเอไมด์ มีคุณสมบัติในการปรับปรุงแบบรูปการแผ่พลังงานที่ดีที่สุด โดยรูปแบบโครงสร้างของโพลไดอิเล็กตริก และสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีสไลโพลไดอิเล็กตริกต้นแบบดังแสดงในรูปที่ 5.10 และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของโพลไดอิเล็กตริกของสายอากาศต้นแบบดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีสไโหลตไดอิเล็กตริก

ค่าพารามิเตอร์	ขนาด(λ)	ขนาด (mm)
ความหนาของโหลตไดอิเล็กตริก (H_D)	0.25	7.5
เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของโหลตไดอิเล็กตริก (D_D)	1	30
ระยะตำแหน่งการวางโหลตไดอิเล็กตริก (S_D)	2.554	76.24



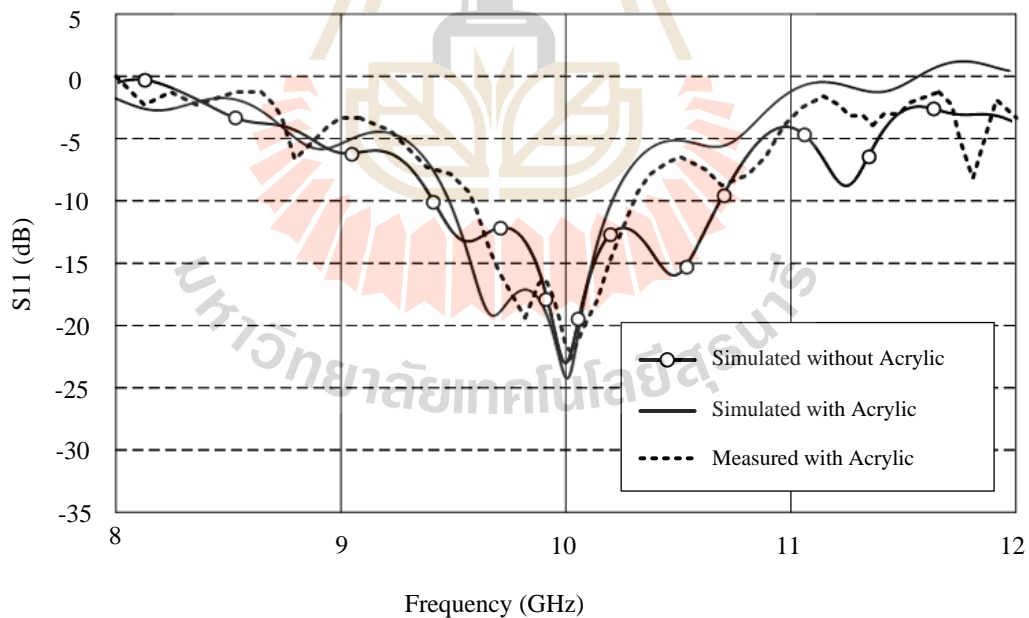
(ก) โครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีสไโหลตไดอิเล็กตริก



(ข) สายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีสไโหลตไดอิเล็กตริกต้นแบบรูปที่ 5.10 สายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีสไโหลตไดอิเล็กตริก

5.3.1 ผลการวัดทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน

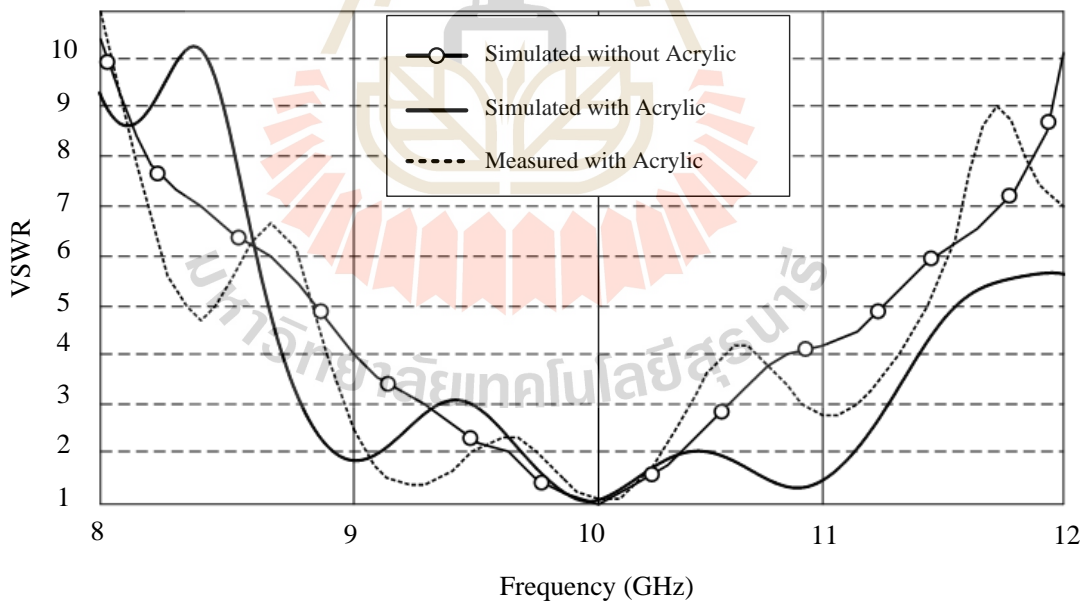
จากสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีใส่โพลติไดอิเล็กทริกต้นแบบที่ทำการสร้างขึ้นมาเรียบร้อยแล้ว จึงนำสายอากาศปากแตรที่ได้มาทำการเปรียบเทียบผลการวัดกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST จากรูปที่ 5.11 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับระหว่างผลการวัดและผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST จะสังเกตได้ว่าที่ความถี่ปฏิบัติการ 10 GHz สายอากาศต้นแบบมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST มีค่าเท่ากับ -24.62 dB และจากผลการวัดมีค่าเท่ากับ -27.27 dB ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่ากราฟทั้งสองมีความสอดคล้องกัน ณ ความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อพิจารณาในส่วนของความกว้างแถบความถี่สังเกตได้ว่าผลจากการวัดจะมีค่าความกว้างแถบความถี่แคบกว่าผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่ปฏิบัติการจะพบว่าการสะท้อนกลับเกิดขึ้นซึ่งเป็นผลกระทบจากตัวโครงสร้างโพลติไดอิเล็กทริกที่ทำการสร้างขึ้นจริง ในการพิจารณาความกว้างแถบความถี่พบว่าผลการวัดทดสอบมีความกว้างแถบความถี่น้อยกว่าผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST โดยผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST มีค่าเปอร์เซ็นต์ความกว้างแถบเท่ากับ 9.45% และจากผลการวัดเท่ากับ 9.13 %



รูปที่ 5.11 กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับระหว่างผลการจำลองและผลวัดทดสอบของสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีใส่โพลติไดอิเล็กทริกต้นแบบ

5.3.2 ผลการวัดทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

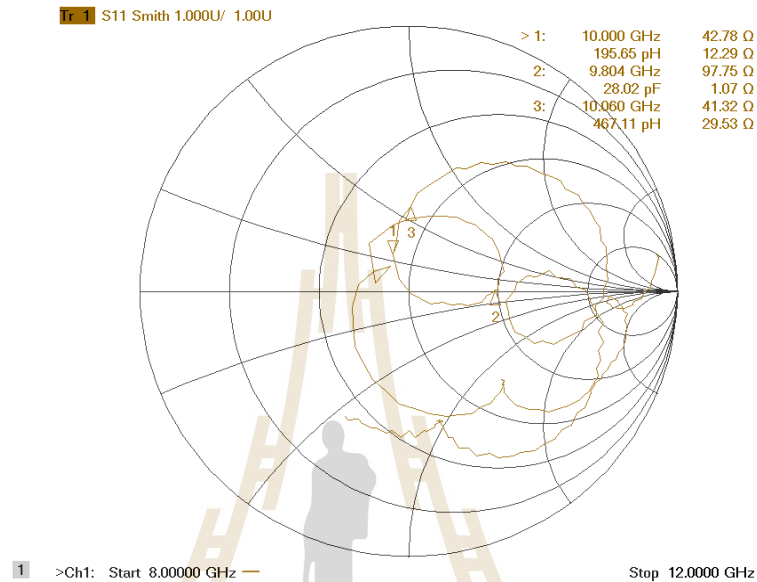
จากสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีใส่โพลด์ไดอิเล็กทริกต้นแบบที่ทำการสร้างขึ้นมาเรียบร้อยแล้ว ค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของสายอากาศอีกค่าหนึ่งก็คือค่าความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง คือค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) สำหรับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งสามารถมีค่าต่ำสุดตั้งแต่ 1 ถึงอนันต์ โดยถ้าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าสายอากาศนั้นมีการแมตซ์ที่สมบูรณ์ หมายความว่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้าที่ป้อนให้กับสายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานออกไปทั้งหมดไม่มีการสะท้อนกลับมา และถ้าสายอากาศมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง เท่ากับอนันต์หมายความว่าสายอากาศนั้นไม่แมตซ์ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ส่งออกไปเกิดการสะท้อนกลับมาทั้งหมดซึ่งจะส่งผลให้เครื่องส่งได้รับความเสียหายได้ จากการวัดทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีใส่โพลด์ไดอิเล็กทริกด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายที่ความถี่ 10 GHz แล้วทำการเปรียบเทียบผลจากการวัดทดสอบกับผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST จากผลการเปรียบเทียบดังแสดงได้ในรูปที่ 5.12 พบว่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ได้จากการวัดมีค่าเท่ากับ 1.12 และผลที่ได้จากการจำลองมีค่าเท่ากับ 1.02 ซึ่งพบว่ากราฟแสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งของทั้งสองมีความสัมพันธ์และสอดคล้องกัน



รูปที่ 5.12 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนคลื่นนิ่งระหว่างผลการจำลองและผลวัดทดสอบของสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีใส่โพลด์ไดอิเล็กทริกต้นแบบ

5.3.3 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์

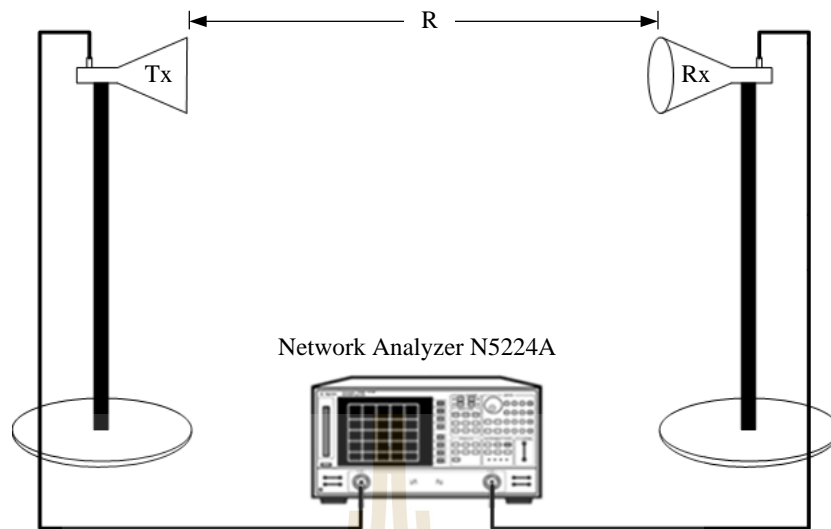
จากการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีสไลโพลไดอิเล็กตริกด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ที่ความถี่ 10 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 5.13 มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 42.78 Ω ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ยอมรับได้ คือ 50 Ω



รูปที่ 5.13 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีสไลโพลไดอิเล็กตริกต้นแบบ

5.3.4 ผลการวัดทดสอบอัตราขยาย

สำหรับการวัดอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีสไลโพลไดอิเล็กตริกต้นแบบที่สร้างขึ้น โดยทำการวัดทดสอบในห้องไม่สะท้อนคลื่น ซึ่งมีระยะ R คือระยะห่างระหว่างการติดตั้งสายอากาศต้นแบบที่ทำการวัดทดสอบกับสายอากาศอ้างอิงเท่ากับหรือมากกว่าสามระยะไกล คือ $R \geq 2D^2/\lambda$ โดยที่ D คือ ขนาดของสายอากาศวัดทดสอบ จากการคำนวณสามระยะไกลได้ระยะ $R \geq 0.5$ เมตร ในการวัดทดสอบนี้ได้กำหนดให้ระยะ $R = 1$ เมตรเพื่อใช้ในการวัดทดสอบ โดยใช้สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากซึ่งมีความถี่ปฏิบัติการอยู่ที่ 10 GHz เป็นสายอากาศอ้างอิงมาทำหน้าที่เป็นสายอากาศในภาคส่งซึ่งสายอากาศดังกล่าวได้มีการวัดทดสอบมาตรฐานอัตราขยายเรียบร้อยแล้วโดยมีอัตราขยายที่ความถี่ปฏิบัติการ 10 GHz เท่ากับ 18.218 dBi และสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีสไลโพลไดอิเล็กตริกต้นแบบเป็นสายอากาศภาครับ ดังแสดงในรูปที่ 5.14 จากนั้นทำการนำสมการการส่งผ่านของพริสมาใช้ในการคำนวณหาค่าอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีสไลโพลไดอิเล็กตริกต้นแบบ จากสมการ (5.1) พบว่าอัตราขยายที่ได้จากการวัด ณ ที่ความถี่ 10 GHz มีค่าเท่ากับ 18.168 dBi



(ก) แสดงวิธีการวัดทดสอบอัตราขยาย

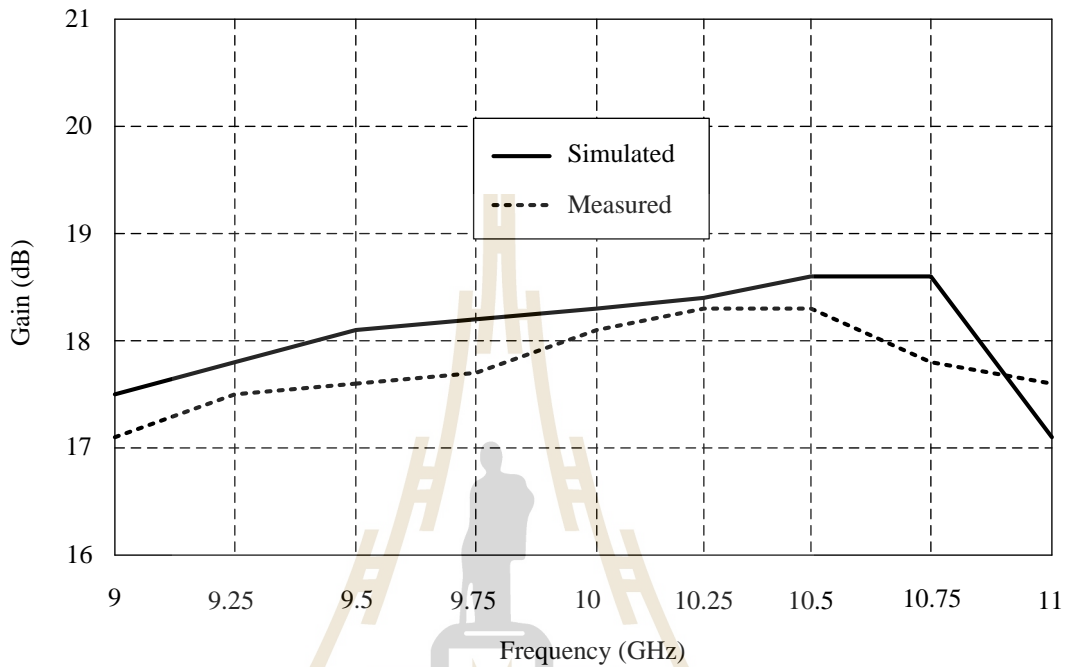


(ข) การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบอัตราขยาย

รูปที่ 5.14 วิธีการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีสี่เหลี่ยม
ไดอิเล็กทริก

จากนั้นได้ทำการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีสี่เหลี่ยมไดอิเล็กทริกต้นแบบในช่วงความถี่แถบความถี่ของสายอากาศโดยทำการเปรียบเทียบอัตราขยายระหว่างผลการวัดทดสอบและผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST โดยแสดงการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศในช่วงความถี่ตั้งแต่ 9 GHz – 11 GHz ซึ่งในขั้นตอนการวัดอัตราขยายโดย

ใช้วิธีการวัดอัตราขยายตามที่ได้กล่าวไว้แล้ว ซึ่งสายอากาศที่นำมาใช้เป็นสายอากาศในภาคส่งคือสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ได้ทำการทดสอบมาตรฐานอัตราขยายในแต่ละช่วงความถี่เป็นที่เรียบร้อยแล้วโดยกราฟผลการเปรียบเทียบอัตราขยายดังแสดงในรูปที่ 5.15

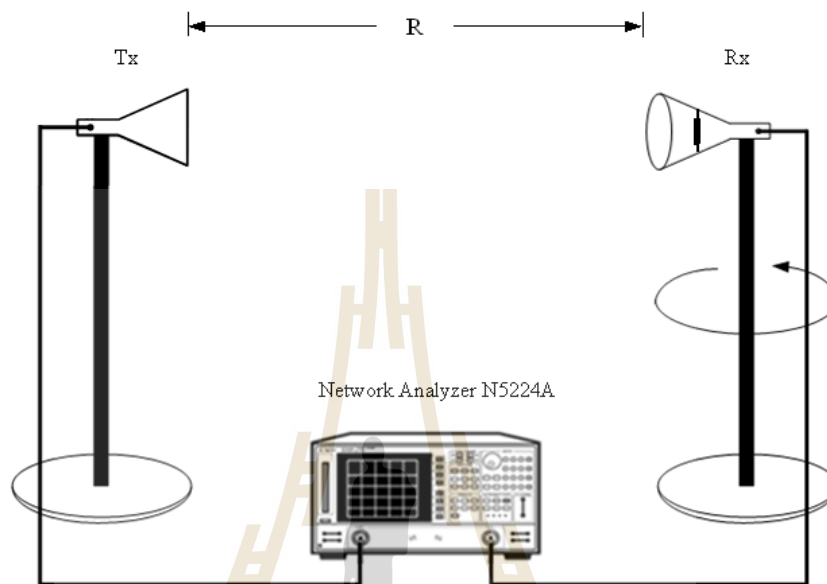


รูปที่ 5.15 ผลการเปรียบเทียบอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีสี่เหลี่ยม
ไดอิเล็กทริกในช่วงความถี่ตั้งแต่ 9 GHz -11 GHz

5.3.5 ผลการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน

จากรูปที่ 5.16 และ 5.17 แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีสี่เหลี่ยมไดอิเล็กทริกทั้งในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามลำดับ โดยทำการทดสอบในห้องไม่สะท้อนคลื่นและมีระยะ R ในการติดตั้งระหว่างสายอากาศต้นแบบที่ทำการวัดทดสอบกับสายอากาศอ้างอิงเท่ากับหรือมากกว่าสนามระยะไกล คือ $R \geq 2D^2/\lambda$ โดยที่ D คือขนาดของสายอากาศวัดทดสอบ จากการคำนวณสนามระยะไกลได้ระยะ $R \geq 0.5$ เมตร ซึ่งงานการวัดทดสอบนี้ได้กำหนดให้ระยะ $R = 1$ เมตร โดยใช้สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากซึ่งมีความถี่ปฏิบัติการอยู่ที่ 10 GHz เป็นสายอากาศอ้างอิงโดยทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่ง และในการวัดทดสอบจะทำการหมุนสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีสี่เหลี่ยมไดอิเล็กทริก(สายอากาศภาครับ) ซึ่งจะมีการหมุนรอบแนวแกนหมุนในแต่ละระนาบเพื่อรับคลื่นจากสายอากาศภาคส่งตั้งแต่มุม 0 องศาจนถึงมุม 360 องศา ทำให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศทั้งหมดในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 5.18 จากผลการวัดทดสอบสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีสี่

โพลติไดอิเล็กทริกต้นแบบ พบว่าแบบรูปการแผ่พลังงานของในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ซึ่งมีลักษณะของแบบรูปการแผ่พลังงานใกล้เคียงกับแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว

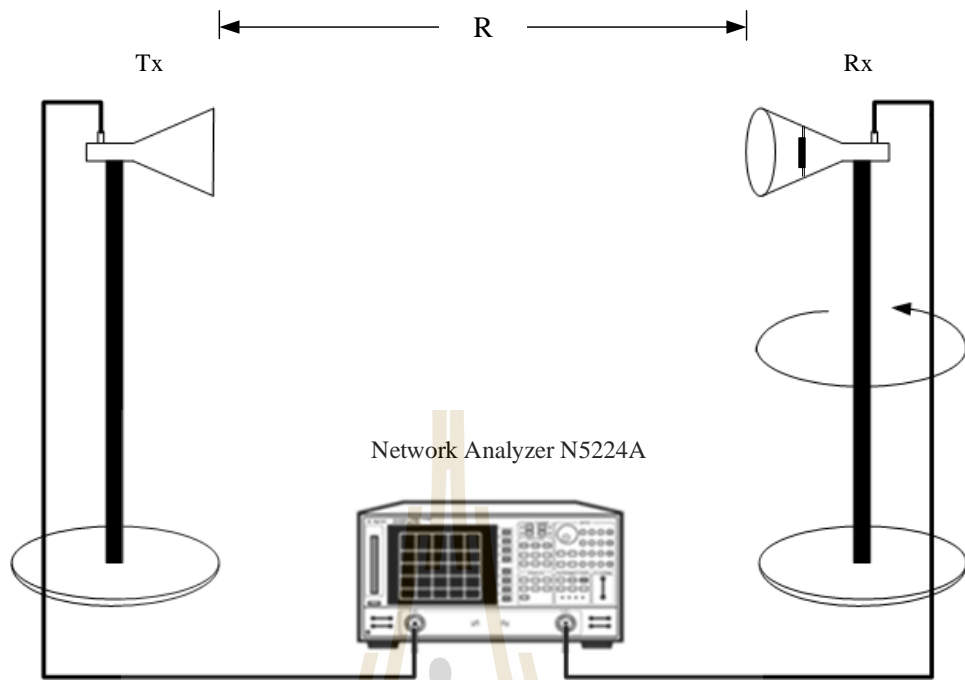


(ก) แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

รูปที่ 5.16 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีใส่โพลติไดอิเล็กทริก

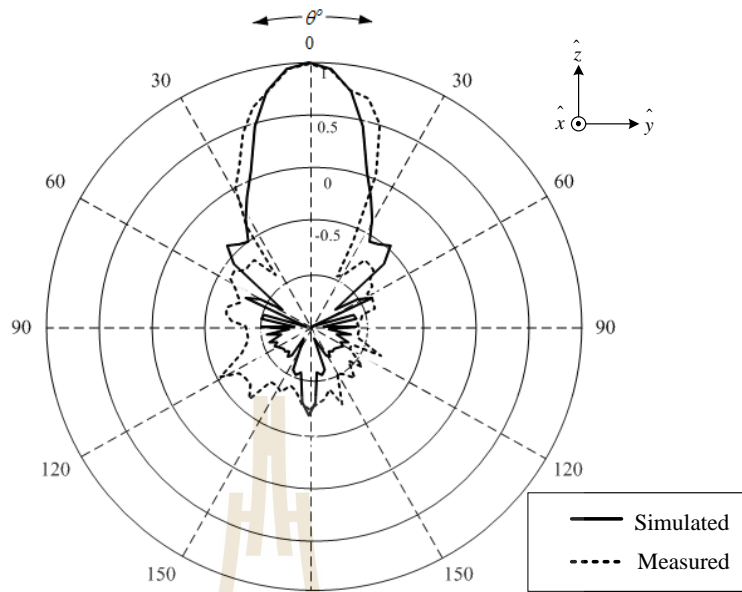


(ก) แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

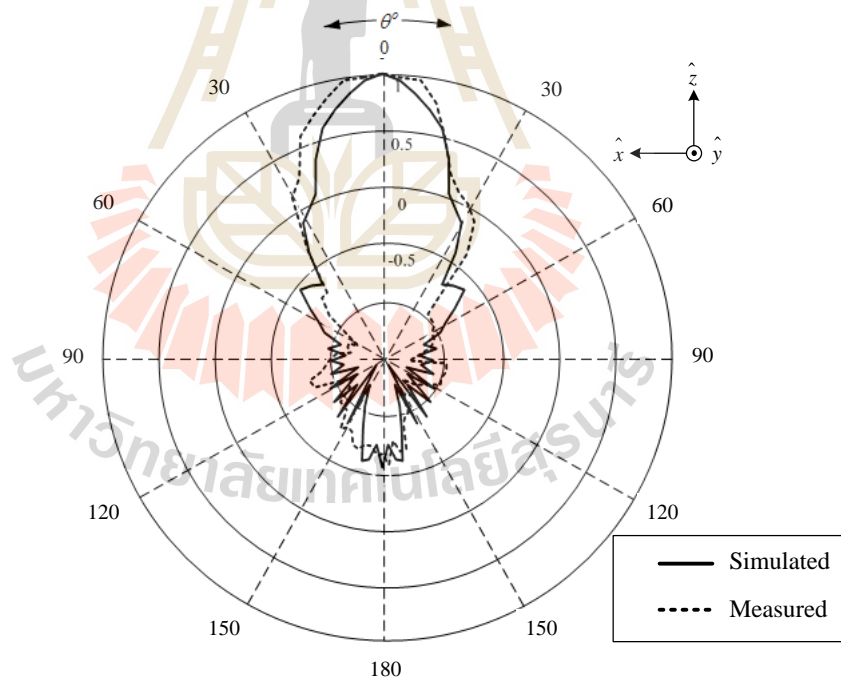


(ข) การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.17 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร
รูปกรวยกรณีสโกลดไดอิเล็กตริก



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

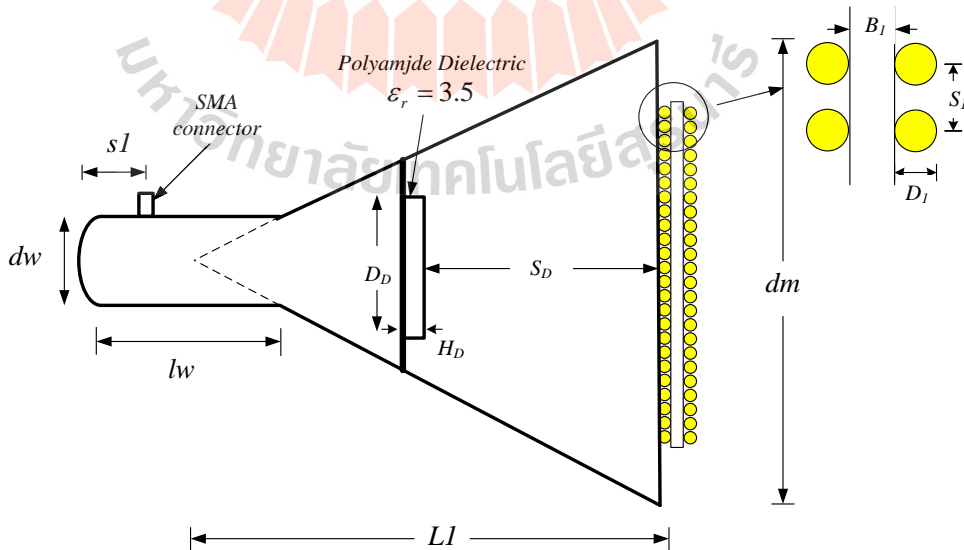
รูปที่ 5.18 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานระหว่างผลการจำลองและการวัดของสายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีใส่โหลดไดโอดเล็กตริก

5.4 สายอากาศปากแตรโดยใช้คุณสมบัติของวัสดุบวมโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด

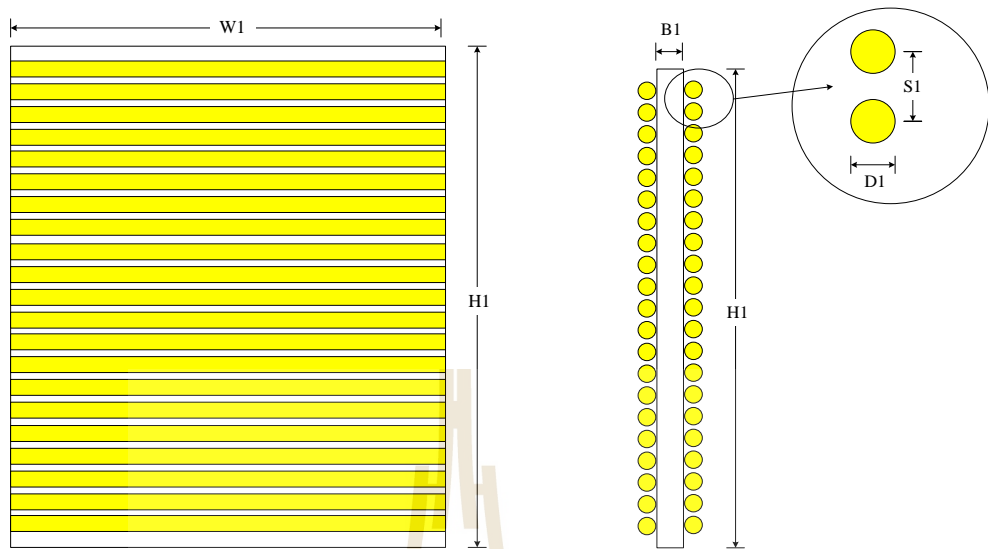
สายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติของวัสดุบวมโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดคือสายอากาศที่นำเสนอในงานวิจัยชิ้นนี้ซึ่งจากการออกแบบและวิเคราะห์ในบทที่ผ่านมาจนกระทั่งได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีความเหมาะสมเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ได้กำหนดได้ แล้วทำการนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบขึ้นมา โดยโครงสร้างของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติของวัสดุบวมโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดได้แสดงดังรูปที่ 5.19 ซึ่งจะประกอบด้วยเทคนิคการใส่โพลติไดอิเล็กทริกภายในสายอากาศปากแตรเพื่อใช้ในการปรับปรุงแบบรูปการแผ่พลังงานและการนำโครงสร้างตัวแบบเส้นลวดเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศปากแตรรูปกรวย โดยได้แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศดังตารางที่ 5.3 หลังจากนั้นทำการวัดเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศและเปรียบเทียบผลของการวัดกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST

ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของโครงสร้างสื่อตัวกลางแบบเส้นลวด

ค่าพารามิเตอร์	ขนาด (λ)	ขนาด (mm)
ความหนาของไดอิเล็กทริกสื่อตัวกลางแบบเส้นลวด (B_1)	0.166λ	3.5
ความกว้างของไดอิเล็กทริกสื่อตัวกลางแบบเส้นลวด (W_1)	2λ	60
ความสูงของไดอิเล็กทริกสื่อตัวกลางแบบเส้นลวด (H_1)	2.26λ	68
ระยะห่างระหว่างเส้นลวดที่วางขนานกัน (S_1)	0.166λ	3.5
เส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวด (D_1)	0.083λ	2.5



(ก) โครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยที่นำเสนอ



(ข) โครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลาด

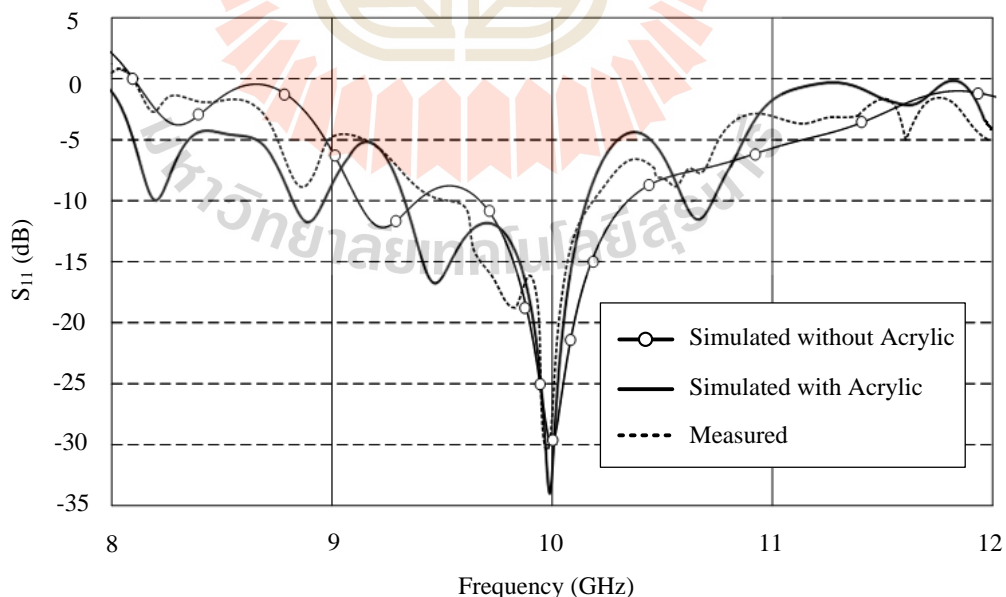


(ค) สายอากาศต้นแบบ

รูปที่ 5.19 สายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติของวัสดุบนโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลาด

5.4.1 ผลการวัดทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน

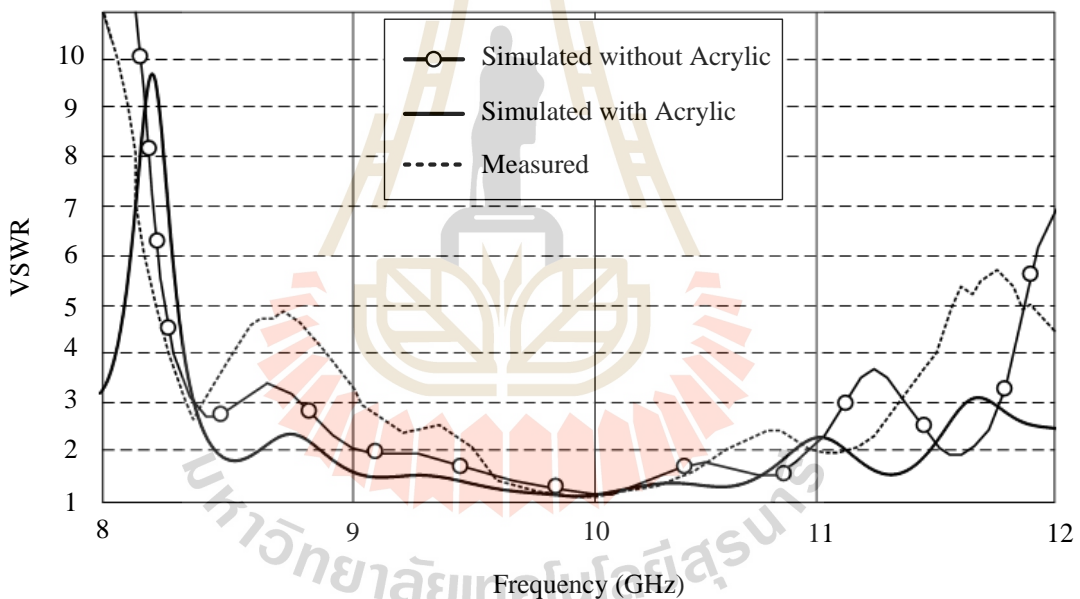
ในการวัดทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศได้ทำการวัดทดสอบภายในห้องไม่สะท้อนคลื่น โดยในรูปที่ 5.20 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติอิมพีแดนซ์คอนจูเกตของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่นำเสนอจะสังเกตได้ว่าที่ความถี่ปฏิบัติการ 10 GHz สายอากาศต้นแบบมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST โดยทำการจำลองใน 2 แบบ โดยแบบแรกจำลองโดยการวางโหนดไดอิเล็กทริกโดยไม่มีฐานยึดและในแบบที่สองทำการจำลองโดยการติดตั้งแผ่นอะคริลิกเพื่อติดตั้งโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด โดยผลที่ได้จากการจำลองมีค่าเท่ากับ -29.87 dB และ -34.24 dB ตามลำดับ ในส่วนผลที่ได้จากการวัดมีค่าเท่ากับ -30.18 dB ซึ่งจะเห็นได้ว่ากราฟที่ได้มีความสอดคล้องกัน ณ ความถี่เรโซแนนซ์ โดยพิจารณาระหว่างผลการจำลองโดยการติดตั้งแผ่นอะคริลิกเพื่อติดตั้งโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดและผลที่ได้จากการวัดจากสายอากาศต้นแบบเมื่อพิจารณาความกว้างแถบความถี่จะพบว่ามีความกว้างแถบความถี่ที่ใกล้เคียงกันแต่ช่วงความถี่แถบความถี่เรโซแนนซ์จะเลื่อนลงมาทางด้านความถี่ต่ำเล็กน้อย และพบว่าผลจากการวัดสายอากาศต้นแบบที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่ปฏิบัติการจะเกิดการสะท้อนกลับของคลื่นเล็กน้อย ในส่วนของความถี่แถบความถี่พบว่าผลการวัดทดสอบมีความถี่น้อยกว่าผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST โดยผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST มีค่าเปอร์เซ็นต์ความถี่แถบเท่ากับ 6.6% และจากผลการวัดเท่ากับ 6.2 %



รูปที่ 5.20 กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติอิมพีแดนซ์คอนจูเกตของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด

5.4.2 ผลการวัดทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

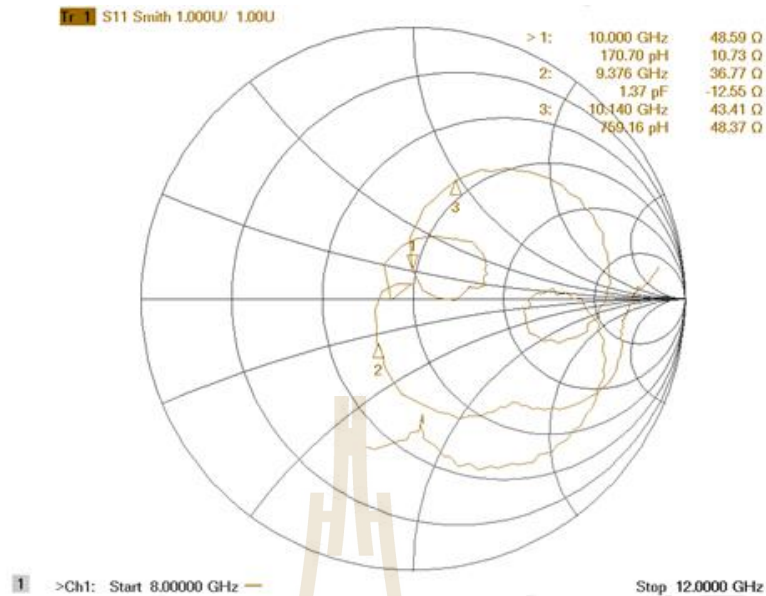
จากรูปที่ 5.21 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติอิมพีแดนซ์ของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดต้นแบบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST โดยทำการจำลองใน 2 รูปแบบ โดยแบบแรกจำลองโดยการวางโหนดไดโพลีเล็กทรอนิกส์โดยไม่มีฐานยึดและในแบบที่สองทำการจำลองโดยการติดตั้งแผ่นอะคริลิกเพื่อยึดโหนดไดโพลีเล็กทรอนิกส์ภายในสายอากาศ จากผลการเปรียบเทียบดังแสดงได้ในรูปที่ 5.21 พบว่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ได้จากการวัดมีค่าเท่ากับ 1.18 และผลที่ได้จากการจำลองซึ่งในแบบแรกจำลองโดยการวางโหนดไดโพลีเล็กทรอนิกส์โดยไม่มีฐานยึดมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 1.02 และในแบบที่สองทำการจำลองโดยการติดตั้งแผ่นอะคริลิกเพื่อยึดโหนดไดโพลีเล็กทรอนิกส์ภายในสายอากาศมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 1.03 ซึ่งพบว่ากราฟแสดงค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของทั้งสองมีสอดคล้องกัน



รูปที่ 5.21 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติอิมพีแดนซ์ของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด

5.4.3 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์

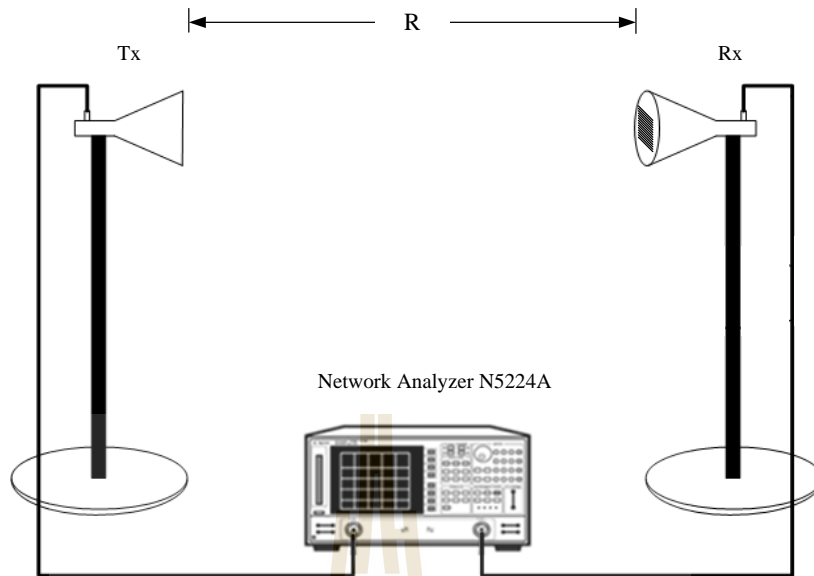
จากการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติอิมพีแดนซ์ของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายที่ความถี่ 10 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 5.22 มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 48.59Ω ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ยอมรับได้ คือ 50Ω



รูปที่ 5.22 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติอิมพีแดนซ์ของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด

5.4.4 ผลการวัดทดสอบอัตราขยาย

สำหรับการวัดอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติอิมพีแดนซ์ของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดต้นแบบได้ทำการวัดทดสอบในห้องไม่สะท้อนคลื่น โดยมีระยะ R คือระยะห่างระหว่างการติดตั้งสายอากาศต้นแบบที่ทำการวัดทดสอบกับสายอากาศอ้างอิงเท่ากับหรือมากกว่าสนามระยะไกล คือ $R \geq 2D^2/\lambda$ โดยที่ D คือ ขนาดของสายอากาศวัดทดสอบ จากการคำนวณสนามระยะไกลได้ระยะ $R \geq 0.5$ เมตร ซึ่งในการวัดทดสอบนี้ได้กำหนดให้ระยะ $R = 1$ เมตร เพื่อใช้ในการวัดทดสอบ โดยใช้สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากซึ่งมีความถี่ปฏิบัติการอยู่ที่ 10 GHz เป็นสายอากาศอ้างอิงมาทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่งซึ่งสายอากาศดังกล่าวได้มีการวัดทดสอบมาตรฐานอัตราขยายเรียบร้อยแล้วโดยมีอัตราขยายที่ความถี่ปฏิบัติการ 10 GHz เท่ากับ 18.21 dBi และสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติอิมพีแดนซ์ของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดต้นแบบเป็นสายอากาศภาครับ ดังแสดงในรูปที่ 5.23 จากนั้นทำการนำสมการการส่งผ่านของฟรีสมาใช้ในการคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติอิมพีแดนซ์ของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดต้นแบบจากสมการ (5.1) จากผลการวัดพบว่าอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติอิมพีแดนซ์ของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดต้นแบบที่ความถี่ 10 GHz มีค่าเท่ากับ 20.718 dBi



(ก) แสดงวิธีการวัดทดสอบอัตรายาย

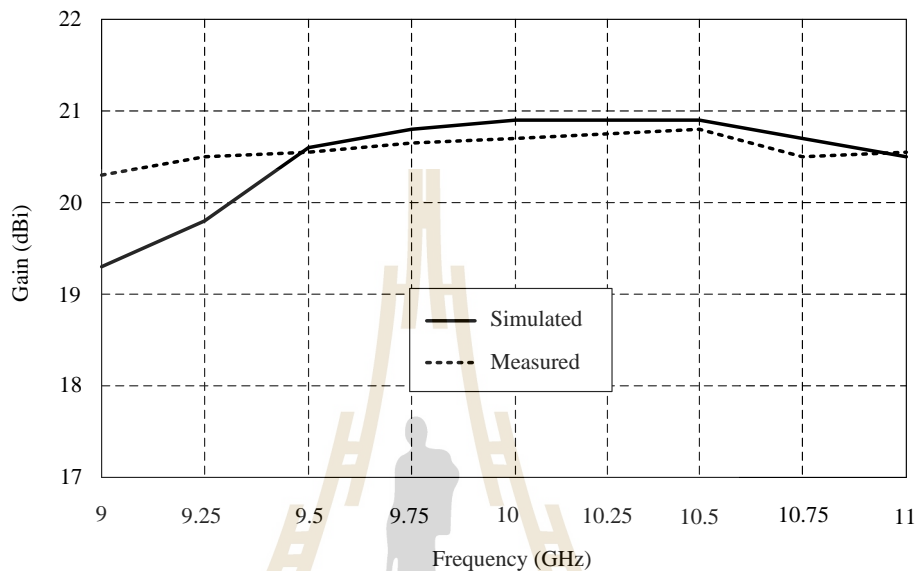


(ข) การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบอัตรายาย

รูปที่ 5.23 วิธีการวัดทดสอบการวัดทดสอบอัตรายายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติของเสาอากาศแบบเส้นลวดต้นแบบ

นอกจากนี้ในการวัดทดสอบได้ทำพิจารณาการวัดทดสอบอัตรายายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติของเสาอากาศแบบเส้นลวดต้นแบบในช่วงความถี่แถบความถี่ของสายอากาศโดยทำการเปรียบเทียบอัตรายายระหว่างผลการวัดทดสอบและผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST โดยทำการวัดทดสอบอัตรายายของสายอากาศในช่วงความถี่

ตั้งแต่ 9 GHz – 11 GHz ซึ่งในขั้นตอนการวัดอัตราขยายโดยใช้วิธีการวัดอัตราขยายตามที่ได้กล่าวไว้แล้ว ซึ่งสายอากาศที่นำมาใช้เป็นสายอากาศในภาคส่งคือสายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ได้ทำการทดสอบมาตรฐานอัตราขยายในแต่ละช่วงความถี่เป็นที่เรียบร้อยแล้วโดยกราฟผลการเปรียบเทียบอัตราขยายดังแสดงในรูปที่ 5.24

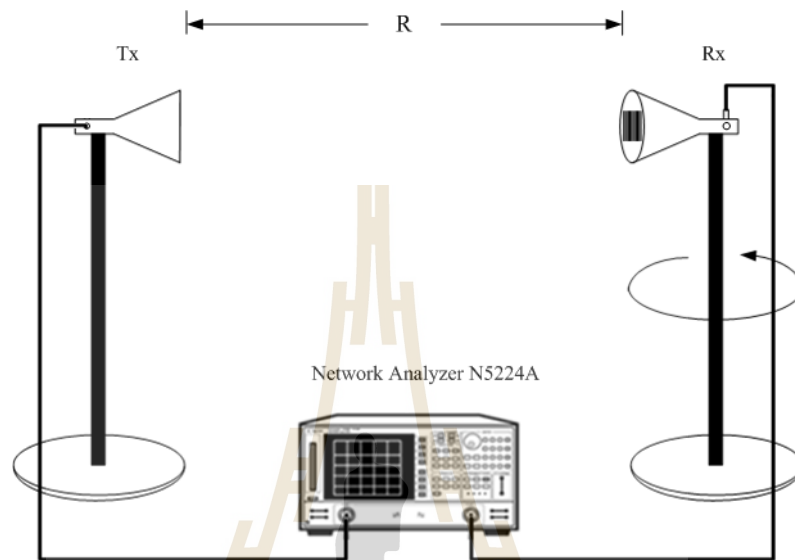


รูปที่ 5.24 แบบจำลองการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติอิมพีแดนซ์ของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดต้นแบบ

5.4.5 ผลการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน

จากรูปที่ 5.25 และ 5.26 แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติอิมพีแดนซ์ของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดต้นแบบทั้งในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามลำดับ โดยทำการทดสอบในห้องไม่สะท้อนคลื่นและระยะ R ในการติดตั้งระหว่างสายอากาศต้นแบบที่ทำการวัดทดสอบกับสายอากาศอ้างอิงเท่ากับหรือมากกว่าสนามระยะไกล คือ $R \geq 2D^2/\lambda$ โดยที่ D คือ ขนาดของสายอากาศวัดทดสอบ จากการคำนวณสนามระยะไกลได้ระยะ $R \geq 0.5$ เมตร ซึ่งการวัดทดสอบนี้ได้กำหนดให้ระยะ $R = 1$ เมตร โดยใช้สายอากาศปากแตรรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากซึ่งมีความถี่ปฏิบัติการอยู่ที่ 10 GHz เป็นสายอากาศอ้างอิงโดยทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่ง และในการวัดทดสอบจะทำการหมุนสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติอิมพีแดนซ์ของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด (สายอากาศภาครับ) ซึ่งจะมีการหมุนรอบแนวแกนหมุนในแต่ละระนาบเพื่อรับคลื่นจากสายอากาศภาคส่งตั้งแต่มุม 0 องศา จนถึงมุม 360 องศา ทำให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศทั้งหมดในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 5.27 จากผลการวัดทดสอบสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้

คุณสมบัติอภิวัดคุณสมบัติของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดตันแบบ พบว่าแบบรูปการแผ่พลังงานของใน ระบายสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็กและโพราไรเซชันไขว้มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองด้วย โปรแกรมสำเร็จรูป CST ซึ่งมีลักษณะของแบบรูปการแผ่พลังงานใกล้เคียงกับแบบรอบทิศทางใน ระบายเดี่ยว

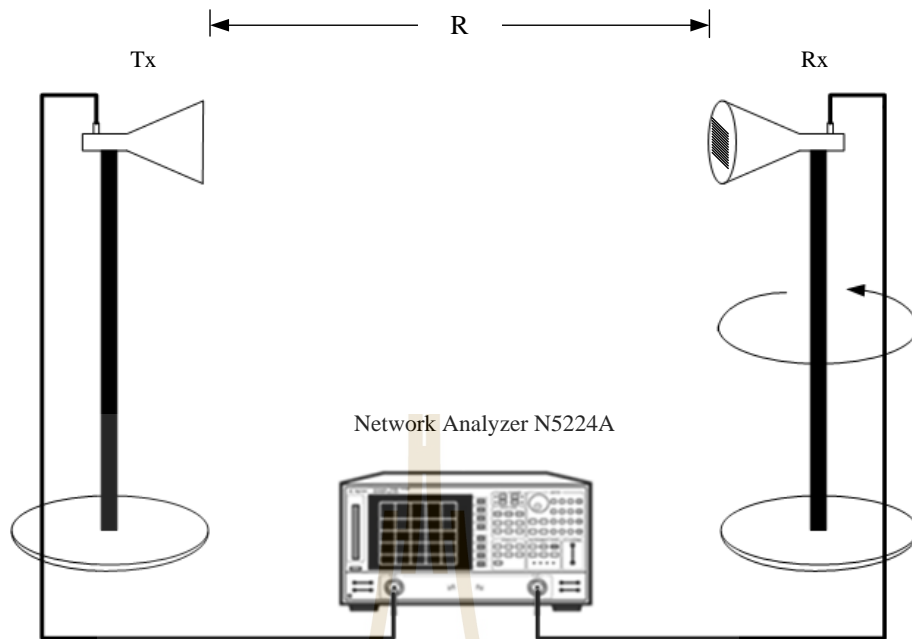


(ก) แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระบายสนามไฟฟ้า



(ข) การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระบายสนามไฟฟ้า

รูปที่ 5.25 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระบายสนามไฟฟ้าของสายอากาศปากแตร รูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติอภิวัดคุณสมบัติของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด

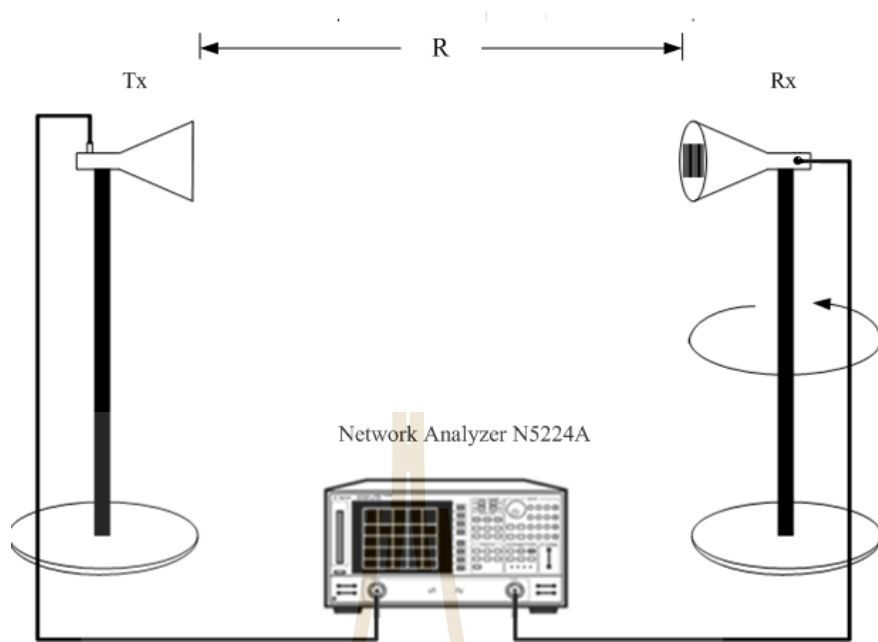


(ก) แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก



(ข) การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.26 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติของเสาอากาศโครงสร้างสื่อตัวกลางแบบเส้นลวด

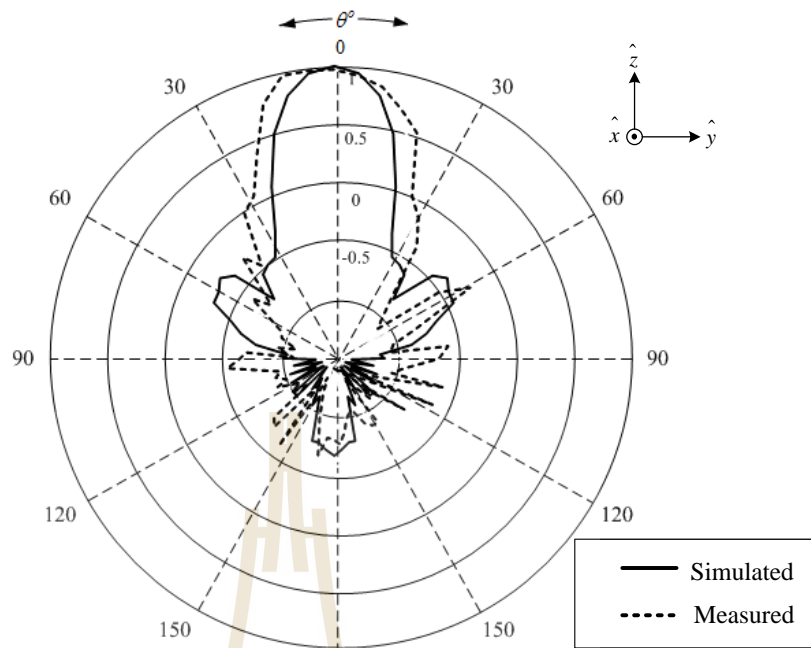


(ก) แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบโพลาไรซ์ไขว้

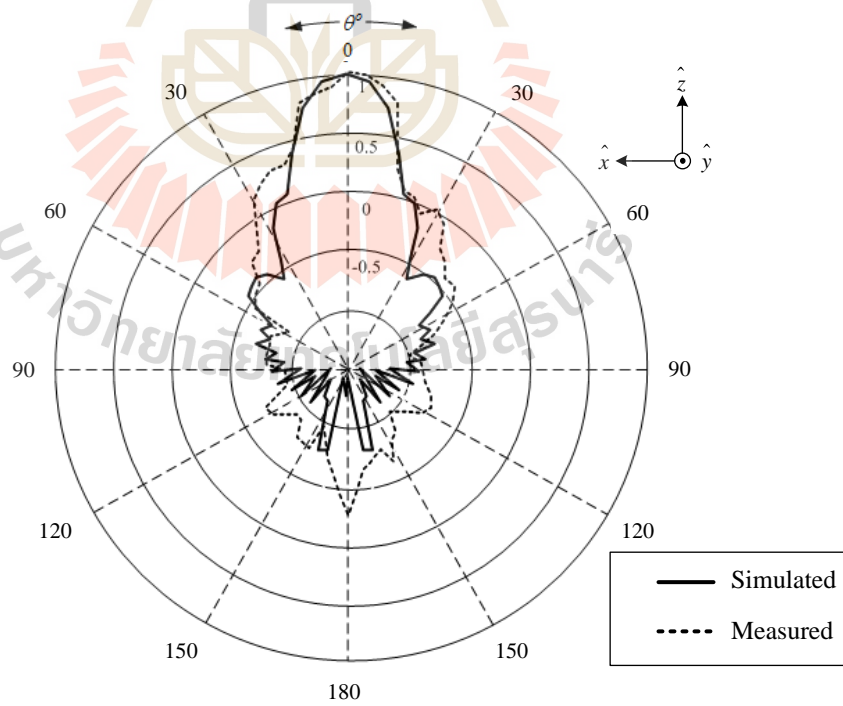


(ข) การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบโพลาไรซ์ไขว้

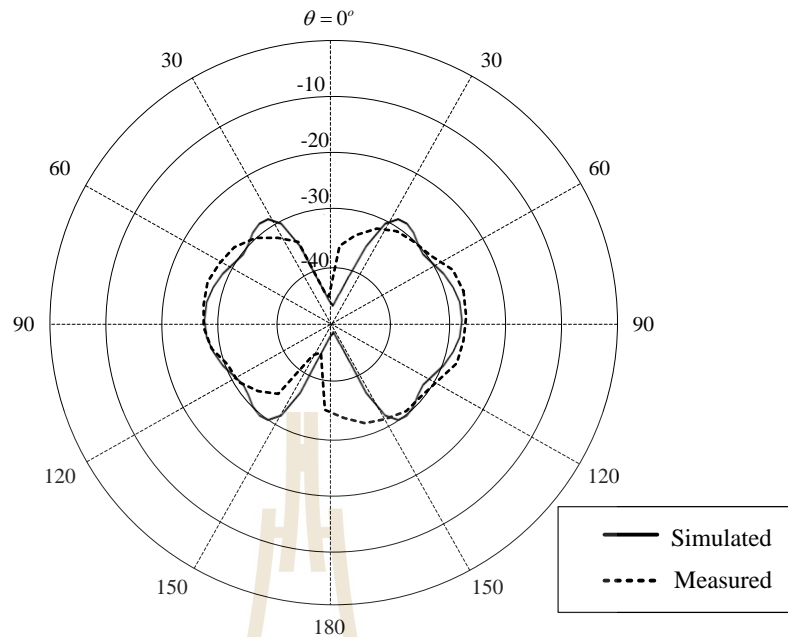
รูปที่ 5.27 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบโพลาไรซ์ไขว้ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติอิมปีแดนซ์บนโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก



(ค) รูปแบบโพลาริไรซ์ไขว้

รูปที่ 5.28 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานในของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้
คุณสมบัติอิมพีแดนซ์คอนจูเกตของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด

5.5 การเปรียบเทียบผลการจำลองโครงสร้างสายอากาศและการวัดทดสอบ

จากการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST กับผลวัดทดสอบสายอากาศต้นแบบที่สร้างขึ้นของสายอากาศ 3 รูปแบบ คือ สายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน สายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีใส่โพลิตไดอิเล็กตริก และสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติอิมพีแดนซ์คอนจูเกตของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ซึ่งประกอบด้วยใส่โพลิตไดอิเล็กตริกเข้าไปภายในสายอากาศและเพิ่มโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดบนแนวระนาบอะเปอร์เจอร์สายอากาศ โดยผลจากการเปรียบเทียบอัตราขยายของสายอากาศทั้ง 3 รูปแบบที่ความถี่ 10 GHz ได้แสดงในตารางที่ 5.4 จากตารางจะแสดงให้เห็นว่าผลที่ได้จากการวัดและทดสอบจากสายอากาศต้นแบบที่สร้างขึ้นจริงนั้นมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยและค่าที่ได้สัมพันธ์กับการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และในตารางที่ 5.5 ได้แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศระหว่างสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติอิมพีแดนซ์คอนจูเกตของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดจะสังเกตได้ว่าสายอากาศที่นำเสนอมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐานโดยอัตราขยายเพิ่มขึ้นจากเดิม 3.2 dB แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศมีความสมมาตรและระดับพู่ซ่างที่เกิดขึ้นต่ำ

ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าเทคนิคการนำคุณสมบัติของวัสดุบนโครงสร้างสื่อตัวกลางแบบเส้นลวดและการใส่โหนดไดอิเล็กตริกสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศปากแตรรูปกรวยได้

ตารางที่ 5.4 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศระหว่างการจำลองการออกแบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัดจากสายอากาศต้นแบบที่ความถี่ 10 GHz

ค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่ 10 GHz	สายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน		สายอากาศปากแตรรูปกรวยที่นำเสนอ	
	ผลการจำลอง	ผลการวัด	ผลการจำลอง	ผลการวัด
ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ S_{11} (dB)	-23.35	-24.23	-29.38	-30.26
ความกว้างแถบ (%)	11	9.34	6.6	6.2
อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR)	1.15	1.31	1.03	1.18
อัตรายาย (dB)	17.7	17.34	20.9	20.76

ตารางที่ 5.5 การเปรียบเทียบอัตรายายที่ความถี่ 10 GHz ของสายอากาศ 4 รูปแบบ

ชนิดสายอากาศ	อัตรายาย [dB] ที่ความถี่ 10 GHz	
	ผลการจำลอง	ผลการวัด
สายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน	17.7	17.67
สายอากาศปากแตรรูปกรวยกรณีใส่โหนดไดอิเล็กตริก	18.4	18.16
สายอากาศปากแตรรูปกรวยที่นำเสนอ	20.9	20.76

5.6 สรุป

ในบทนี้แสดงการสร้างและการวัดทดสอบคุณลักษณะสมบัติของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติของวัสดุบนโครงสร้างสื่อตัวกลางแบบเส้นลวดต้นแบบ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพสายอากาศต้นแบบที่สร้างขึ้นจริง เพื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดทดสอบระหว่างการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio 2009 ว่ามีความสอดคล้องกันมากน้อยเพียงใด ซึ่งคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้จากการวัดทดสอบได้แก่ S_{11} แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในสนามระยะไกล ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้า ระนาบสนามแม่เหล็กและอัตรายาย พบว่าค่า S_{11} และแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศต้นแบบในสนามระยะไกลรวมถึงอัตรายาย ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST และผลการวัดทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับผลบางส่วนที่แตกต่างกันซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากความแม่นยำในการสร้างสายอากาศตลอดจนผลที่เกิดจากการวัดทดสอบในสภาพจริง

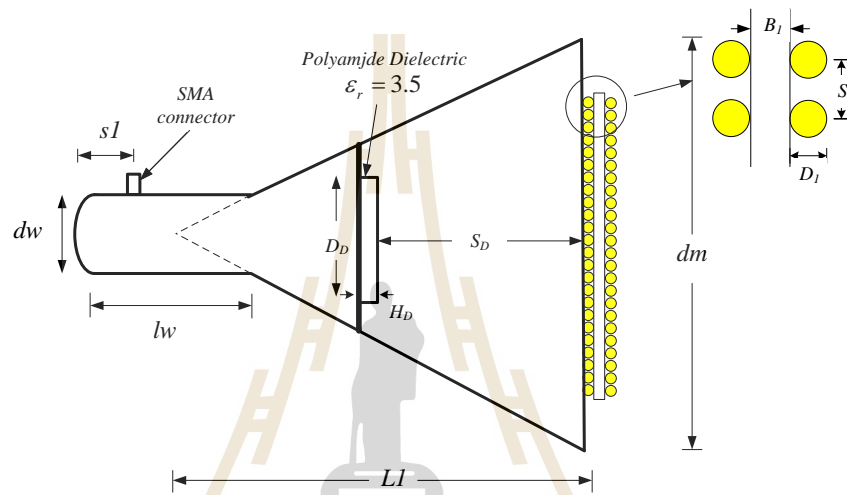
บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ ออกแบบและสร้างสายอากาศต้นแบบของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติของอิมพีแดนซ์ของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด โดยใช้วิธีการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติของอิมพีแดนซ์ของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดเพื่อประยุกต์ใช้งานในระบบเรดาร์ โดยเริ่มจากการศึกษาทฤษฎีเบื้องต้นสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐาน ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวยพบว่ารูปแบบการแผ่กระจายกำลังที่ออกมาที่มีความไม่สมมาตรในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก จึงทำการศึกษาหาวิธีปรับปรุงแบบรูปการแผ่พลังงานเพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่สมมาตรขึ้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่า การนำเทคนิคการใส่โหนดไดโอดอิเล็กทรอนิกส์ภายในสายอากาศปากแตรรูปกรวยสามารถช่วยในการปรับปรุงแบบรูปการแผ่พลังงานอีกทั้งสามารถช่วยในการลดระดับพู่ข้างของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปกรวยได้ จากนั้นจึงได้ทำการออกแบบและวิเคราะห์หารูปแบบโครงสร้างและตำแหน่งในการวางโหนดไดโอดอิเล็กทรอนิกส์ภายในสายอากาศที่เหมาะสม จากการออกแบบพบว่าเมื่อใส่โหนดไดโอดอิเล็กทรอนิกส์ภายในสายอากาศปากแตรรูปกรวยในตำแหน่งที่เหมาะสมสามารถช่วยในการปรับปรุงแบบรูปการแผ่พลังงานทำให้เกิดความสมมาตรมากขึ้นและระดับพู่ข้างลดลงโดยระดับพู่ข้างในระนาบสนามไฟฟ้าเท่ากับ 24.5 dB และในระนาบสนามแม่เหล็กเท่ากับ -25.9 dB เมื่อได้มีการปรับปรุงแบบรูปการแผ่พลังงานเรียบร้อยแล้วจึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของอิมพีแดนซ์เพื่อนำมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศปากแตรรูปกรวย ในงานวิจัยชิ้นนี้มีความสนใจในการนำคุณสมบัติของอิมพีแดนซ์ที่อยู่ในรูปแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ จากการศึกษาและออกแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวด โดยได้อธิบายขั้นตอนในการวิเคราะห์รูปแบบและโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ ซึ่งจากการออกแบบพบว่าโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดเมื่อนำมาทำงานร่วมกับสายอากาศปากแตรรูปกรวยที่ได้ทำการปรับแบบรูปการแผ่พลังงานด้วยการใส่โหนดไดโอดอิเล็กทรอนิกส์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศปากแตรรูปกรวย โดยพบว่าสามารถเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศปากแตรรูปกรวยขนาดมาตรฐานได้ 3.2 dBi อีกทั้งแบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้สมมาตรและระดับพู่ข้างลดลงจากเดิมโดยระดับพู่ข้างในระนาบสนามไฟฟ้ามีค่า

เท่ากับ -26.6 dB และระนาบสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ -26.8 dB จากรูปที่ 6.1 แสดงโครงสร้างและสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้เทคนิค อภิวัดคูณโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดตันแบบที่เสร็จสมบูรณ์ โดยตารางที่ 6.1 ได้แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของโครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้เทคนิคอภิวัดคูณโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดตันแบบที่เสร็จสมบูรณ์และในส่วนของประสิทธิภาพของสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้เทคนิคอภิวัดคูณโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดตันแบบที่เสร็จสมบูรณ์ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 6.2



(ก) โครงสร้างสายอากาศตันแบบที่สมบูรณ์



(ข) สายอากาศตันแบบที่สร้างขึ้น

รูปที่ 6.1 สายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติอภิวัดคูณโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่สมบูรณ์

ตารางที่ 6.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของโครงสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติ
อภิวัดคุณสมบัติของโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่เสร็จสมบูรณ์

ค่าพารามิเตอร์	ขนาด (mm)
เส้นผ่าศูนย์กลางปากอะเพอร์เจอร์สายอากาศปากแตรรูปกรวย (d_m)	120
ความยาวของสายอากาศปากแตรรูปกรวย (L_1)	112.5
เส้นผ่าศูนย์กลางท่อนำคลื่นรูปทรงกระบอก (d_w)	26
ความยาวท่อนำคลื่นรูปทรงกระบอก (l_w)	60
ความหนาของโพลติไดอิเล็กตริก (H_D)	7.5
เส้นผ่าศูนย์กลางของโพลติไดอิเล็กตริก (D_D)	30
ระยะตำแหน่งการวางโพลติไดอิเล็กตริก (S_D)	76.24
ความหนาของไดอิเล็กตริกตัวกลางแบบเส้นลวด ($B1$)	3.5
ความกว้างของไดอิเล็กตริกตัวกลางแบบเส้นลวด ($W1$)	60
ความสูงของไดอิเล็กตริกตัวกลางแบบเส้นลวด ($H1$)	68
ระยะห่างระหว่างเส้นลวดที่วางขนานกัน ($S1$)	3.5
เส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวด ($D1$)	2.5

ตารางที่ 6.2 ประสิทธิภาพของสร้างสายอากาศปากแตรรูปกรวยโดยใช้คุณสมบัติอภิวัดคุณสมบัติ
โครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดที่เสร็จสมบูรณ์

รายการ	รายละเอียด
ช่วงความถี่	9.6 – 10.2 GHz
ความถี่ปฏิบัติการ	10 GHz
อัตราขยาย (10 GHz)	20.71 dB
ประสิทธิภาพของสายอากาศ	95.69%
โพลาริเซชัน	แนวตั้ง
VSWR	1.18
ความกว้างแถบ (%)	6.06%

6.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

จากการนำเสนอคุณสมบัติอภิวัดในรูปแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดมาเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศปากแตรรูปกรวย จากคุณสมบัติข้างต้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการออกแบบร่วมกับสายอากาศประเภทอื่นๆ อีกทั้งสามารถนำคุณสมบัติอภิวัดในรูปแบบโครงสร้างอื่นๆ มาศึกษาและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศต่อไป

ในลำดับสุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังว่าแนวความคิด วิธีการศึกษาวิเคราะห์และออกแบบ รวมถึงผลการวิเคราะห์และผลการทดลองจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์และเป็นแนวทางที่ดีให้แก่ผู้ที่สนใจศึกษาและค้นคว้าเกี่ยวกับเทคนิคที่ช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศโดยใช้คุณสมบัติของอภิวัดในรูปแบบโครงสร้างตัวกลางแบบเส้นลวดต่อไป



รายการอ้างอิง

- รังสรรค์ วงศ์สรรคร์. 2555. **วิศวกรรมสายอากาศ** (พิมพ์ครั้งที่ 3). ศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีการศึกษา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ศราวุธ ชัยมูล และประยุทธ์ อัครเอกมาลิน.(2557). **อภิวัตต์สำหรับประยุกต์ใช้ด้านสายอากาศ**. Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Vol.21, no.2, 2557.
- Southworth, G. C. and King, A. P. (1939). **Metal Horns as Directive Receivers of Ultra-Short Wave**. Proceedings of the IRE, Vol.27, no.2, pp. 95-102.
- King, A. P. (1950). **The radiation characteristics of conical horn antenna**. Proc.IRE, vol. 38, no. 3, pp.249-251.
- Clenet, M.and Shafai, L. (1998). **Gain Enhancement of Conical Horn by Introducing Bodies of Revolution inside the Horn**. Antennas and Propagation Society International Symposium, vol.3, pp. 1718-1721.
- Granet. C. (2003). **Design of a Compact C-Band Receive-Only Horn for Earth Station Antenna G/T_A Performance**. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 2, no.1, pp. 294-297.
- Leger, L., Monediere,T. and Jeeko, B. (2005). **Enhancement of Gain and Radiation Bandwidth for a Planar 1-D EBG Antenna**. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol.15, no.9, pp. 573-575.
- Silveirinha, M. G. and Fernandes, C. A. (2005). **Homogenization of 3-D-Connected and Nonconnected Wire Metamaterials**. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol.53, no.4, pp. 1418-1430.
- Sardi, G. M., Donzelli, G. and Capolino, F. (2006). **High Directivity at Broadside with New Radiators made of Dielectric EBG Materials**. 2006 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, pp. 373-376.
- Jelinek, L., Machac, J. and Zehentner, J. (2007). **Metamaterials- A Challenge for Contemporary Advanced Technology**. 2007 17th International Conference Radioelectronika, pp. 1-12.

- Ikonen, M. T., Saenz, E., Gonzalo, R. and Tretyakov, S. A. (2007). **Modeling and Analysis of composite Antenna Superstrates Consisting on Grids of Loaded Wires**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.55, no.10, pp.2692-2700.
- Zhao, Y., Belov, P. A. and Hao, Y. (2007). **Modelling of Wave Propagation in wire Media Using Spatially Dispersive Finite-Difference Time-Domain Method: Numerical Aspects**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 55, no. 6, pp. 1506-1513.
- Tan, C. Y., Selvan, K. T. and Cross, T. (2008). **Performance Improvement of Conical Horn by using Inserted Metallic Sphere**. RFM 2008 IEEE International RF and Microwave Conference.
- Tan, C. Y., Selvan, K. T. and Cross, T. (2008). **A Dielectric-loaded Long Conical Horn for Improved Performance**. Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility.
- Chantalat, R., Menudier, C., Thevenot, M., Monediere, T., Arnaud, E. and Dumon, P. (2008). **Enhanced EBG Resonator Antenna as Feed of a Reflector Antenna in Ka Band**. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 7, pp. 349-353.
- Brown, K., Chen, C. C. and Burnside, W.D. (2008). **A Novel Design of a Miniature Wideband Corrugated Horn Antenna Employing Unique Sinusoidal Shaped Ridges**. 2008 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium.
- Burghignoli, P., Lavat, G., Capolino, F., Jackson, D. R. and Wilton, D. R. (2008). **Directive Leaky-Wave Radiation From a dipole Source in a Wire-Medium Slab**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.56, no.5, pp. 1329-1339.
- Burghignoli, P., Lavat, G., Capolino, F., Jackson, D. R. and Wilton, D. R. (2008). **Modal Propagation and Excitation on a Wire-Medium Slab**. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol.56, no.5, pp. 1119-1124.

- Lavat, G. (2009). **Near-Field Shielding Effectiveness of 1-D Periodic Planar Screens With 2-D Near-Field Sources**. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol.51, no.3, pp.708-719.
- Li, Y. (2009). **Investigation of minimum Cavity Height of Small EBG-Resonator Antennas for Maximum Directivity**. 2009 Asia Pacific Microwave Conference, pp.2687-2690.
- Hasan, S. A. (2010). **Design & Measurements Techniques for Circularly Polarized, Dual Fed, High Gain, Lightweight, Wideband Conical Horn Antenna with Suppressed Side Lobe & High Performance Radome for Space Application**. Proceedings of the 9th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, pp.26-29.
- Zhou, R., Zhang, H. and Xin, H. (2010). **Metallic Wire Array as Low-Effective Index of Refraction Medium for Directive Antenna Application**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.58, no.1, pp.79-87.
- Kanso, A., Chantalat, R., thevenot, M., Arnaud, E. and Monediere, T. (2010). **Offset Parabolic Reflector Antenna Fed by EBG Dual-Band Focal Feed for Space Application**. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol.9, no.1, pp.854-858.
- Wartak, M. S., Trakmakidis, K. L. and Hess, O. (2011). **Introduction to Metaterials**. Physic in Canada, vol.67, no.1, pp. 30-34.
- Piksa, P. (2011). **Comparison of Conical Horn with Optimized Corrugated Surface and Corrugated Horn**. Proceedings of 21st International Conference Radioelektronika.
- Jiang, H., Jiang, W. and Ning, Y. (2012). **Design of Novel R-Band Conical Horn Antenna Fed with Rectangle Waveguide,** 2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Vol.3, no.1, pp.567-584.
- Turk, A. S. and Keskin, A. K. (2012). **Partially Dielectric-Loaded Ridged Horn Antenna Design for Ultrawideband Gain and Radiation Performance Enhancement**. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol.117, no.1,

pp. 921-924.

- Jun, Y. C., Reno, J. L., Sinclair, M. and Brener, I. (2013). **Epsilon near zero subwavelength optoelectronics electrically tunable ENZ strong coupling.** 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO).
- Doumanis, E., Zelenchuk, D., Fusco, V. and Goussetis, G. (2013). **Conical Horn Antenna with Spiral Phase Plate for Difference Pattern Generation.** 2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp.1309 – 1312.
- Tan, C.Y. and Selvan, K.T. (2013). **Conical Horn Antenna with Spiral Phase Plate for Difference Pattern Generation.** 2013 7th European Conference Antennas and Propagation (EuCAP).
- Ramaccia, D., Scattone, F., Bilotti, F. and Toscano, A. (2013). **Broadband Compact Horn Antennas by Using EPS-ENZ Metamaterial Lens.** IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 61, No. 6, 2929-2937.
- Abosrewal, N. A. Balanis, C. A. and Birtcher, C. R. (2013). **Conical Horn: Gain and Amplitude Patterns.** IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 61, No. 7, 3427-3433.
- Abosrewal, N. A. Balanis, C. A. and Birtcher, C. R. (2013). **Improved gain and loss factor formulas for a conical horn,** Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI).
- Doumanis, E., Zelenchuk, D., Fusco, V. and Goussetis, G. (2013). **Conical Horn Antenna with Spiral Phase Plate for Difference Pattern Generation.** European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 1309-1312.
- Tellechea, A., Iriarle, J. C., Ederra, I. and Montesano, A. (2013). **Dual Band Compact and Light EBG Superstrate Based Antenna for TT&C Application.** 2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp.2505-2507.
- Forati, E. and Hanson, G. W. (2013). **Scattering From Isotropic Connected Wire Medium Metamaterials: Three-, Two-, and One-Dimensional Cases.** IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 61, No.7, pp. 3564-3574.

- Mustafa K., Al-Nuaimi, T., Hong, W. and Zhang, Y. (2014). **Design of High-Directivity Compact-Size Conical Horn Lens Antenna.** IEEE Antennas and Wireless Propagations Letters, vol. 13, No. 3, pp. 467-470.
- Mustafa K., Al-Nuaimi, T., Hong, W. and Zhang, Y. (2014). **Discrete Dielectric Reflect array and Lens for E-Band with Different Feed.** IEEE Antennas and Wireless Propagations Letters, vol. 13, No. 3, pp. 947-950.
- Reyes-Ayala, M. and Jardon-Aguilar, H. (2014). **Dielectric Load in Short Standard Conical Horns for Satellite Applications.** 2014 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS).
- Yang, Z., Song, W. and Sheng, X. Q. (2014). **A Modified PML in FDTD Modeling of a Uniaxial Wire Medium.** IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 13, No. 1, pp. 1191-1194.
- Morgado, T. A., Alves, J. M., Marcos, J.S., Maslovski, S. I., Fernandes, C. A. and Silveirinha, M.G. (2014). **Spatially Confined UHF RFID Detection with a Metamaterial Grids.** IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 62, no. 1, pp. 378-384.
- Torres, V., Orazbayev, B., Pacheco-pena, V., Teniente, J., Beruete, M., Navarro-Cia, M., Sorolla Ayza, M. and Engheta, N. (2015). **Experimental Demonstration of a Millimeter-Wave Metallic ENZ Lens Based on the Energy Squeezing Principle,”** IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, no. 1, pp. 231-239.
- Burghignoli, P., Lovat, G., Capolino, F., Jackson, D. R. and Wilton, D.R. (2015). **Directive Leaky Wave Radiation from a Dipole Source in a Wire Medium Slab.”** IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 56, no. 5, pp. 1329-1339.
- Forati, E. and Hanson, G.W. (2015). **An Epsilon-Near-Zero Total-Internal-Reflection Metamaterial Antenna.** IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, no.5, pp. 4848-4856.
- Kosulnikov, S., Filonov, D., Glybovski, S., Below, P., Tretyakov, S. and Simovski, C. (2015). **Wire-Medium Hyperlens for Enhancing Radiation From Subwavelength Dipole Sources,”** IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, no.11, pp. 4848-4856.

ประวัติผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ เกิดเมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ.2507 เกิดที่ ตำบลปากน้ำประแสร์ อําเภอกาญจนบุรี จังหวัดระยอง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์ เมื่อปี พ.ศ. 2532 จากนั้นได้ศึกษาต่อระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (วิศวกรรมโทรคมนาคม) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2537 ต่อมาปีพ.ศ. 2541 ได้รับการรับรองด้านวิศวกรรมอวกาศ (Certification in Space Engineer) โดย International Space University, France (SSP'98 at Cleveland State University, Ohio, USA) ได้ศึกษาต่อระดับปริญญาเอกวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (วิศวกรรมโทรคมนาคม) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำเร็จการศึกษาเมื่อปีพ.ศ. 2546 สำหรับประวัติการทำงานในอดีต ปีพ.ศ. 2532 เป็นอาจารย์ประจำแผนกอิเล็กทรอนิกส์ ที่สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ ปีพ.ศ. 2532 ถึง 2533 เป็นอาจารย์พิเศษคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม กรุงเทพมหานคร นอกจากนี้ ปีพ.ศ. 2535 ถึง 2536 เป็นที่ปรึกษาด้านอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ปีพ.ศ. 2546 ถึง 2548 ได้เป็นหัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นอาจารย์พิเศษมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ปีพ.ศ. 2553 ถึง 2553 เป็นรองอธิการบดีฝ่ายพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นนายกสโมสรพนักงานสายวิชาการและสายปฏิบัติการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปัจจุบันเป็นรองศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเป็นคณะกรรมการจัดทำมาตรฐานด้านเทคนิคในกิจการกระจายเสียงและกิจการโทรทัศน์ ตามคำสั่งคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) ที่ 5/2555